

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-14005

(P2002-14005A)

(43)公開日 平成14年1月18日 (2002.1.18)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>  
G 0 1 M 11/02

識別記号

F I  
G 0 1 M 11/02

テマコト<sup>\*</sup>(参考)  
A 2 F 0 6 5

G 0 1 B 11/00

G 0 1 B 11/00

B 2 G 0 8 6  
C 5 F 0 4 6  
B  
Z

審査請求 未請求 請求項の数22 OL (全36頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2000-216868(P2000-216868)

(22)出願日 平成12年7月18日 (2000.7.18)

(31)優先権主張番号 特願2000-123553(P2000-123553)

(32)優先日 平成12年4月25日 (2000.4.25)

(33)優先権主張国 日本 (JP)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン  
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 萩原 恒幸

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内

(74)代理人 100102901

弁理士 立石 篤司

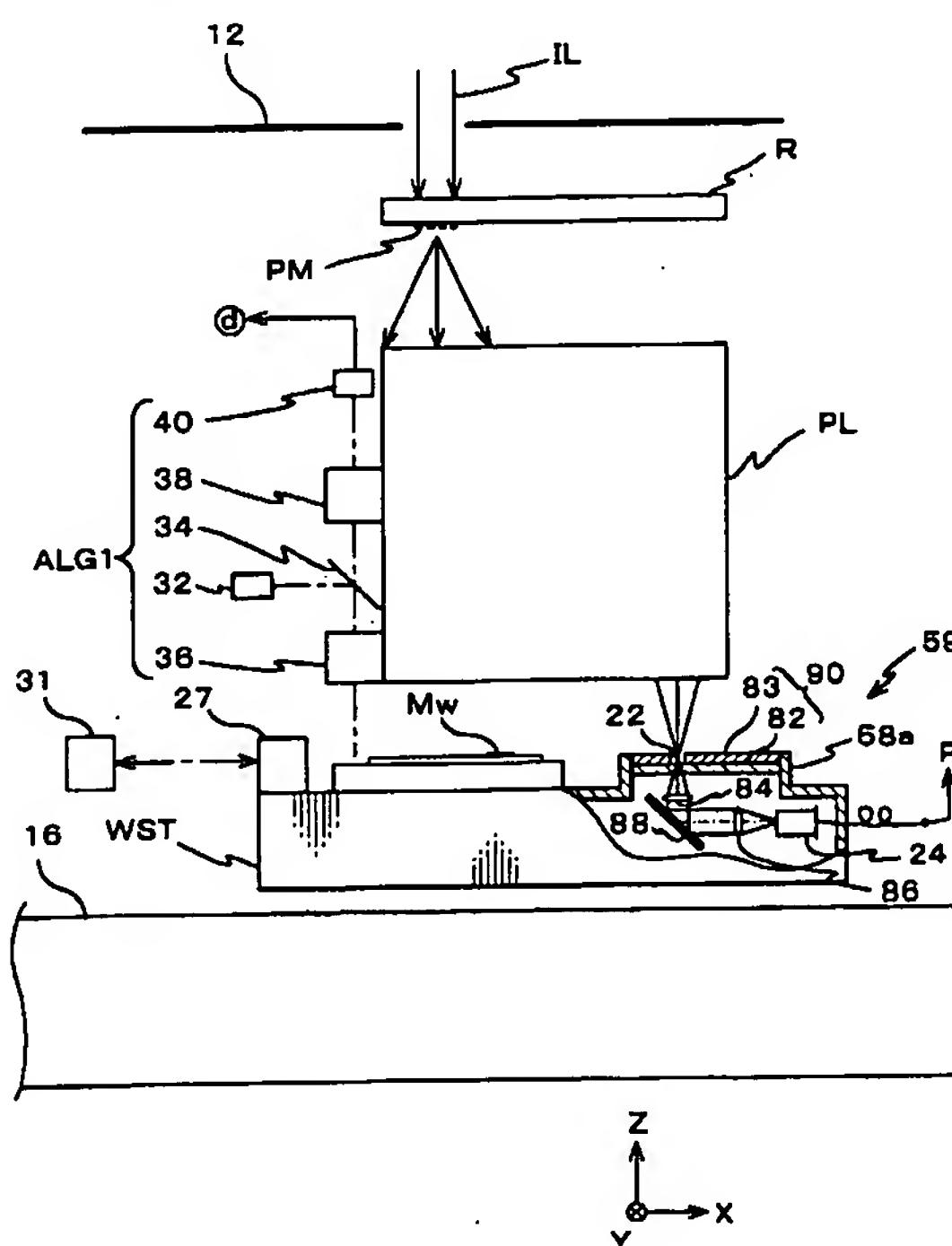
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 空間像計測方法、結像特性計測方法、空間像計測装置及び露光装置

(57)【要約】

【課題】 十分な精度で空間像を計測することを可能にする。

【解決手段】 空間像計測器59のスリット板90には、計測方向(X軸方向)の幅が(波長λ/投影光学系の開口数N. A.)以下でY軸方向に伸びるスリット22が形成されている。このため、照明光ILによって所定のパターンPMが照明され、該パターンの空間像が投影光学系PLを介して像面上に形成された状態で、上記空間像に対してスリット板90がX軸方向に走査されると、その走査中にスリット22を透過した光が光電変換素子24で光電変換され、その光電変換信号(空間像の光強度に対応する信号)が outputされる。そして、この光電変換信号に基づいて制御装置により空間像に対応する光強度分布が計測される。この場合、スリット22の幅が(λ/N. A.)以下とされているため、実用上十分な、高い精度で空間像を計測することができる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む空間像計測方法。

【請求項2】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む空間像計測方法。

【請求項3】 前記スリットの前記第2方向の幅は、零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した $(\lambda/N. A.)$ 以下であることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項4】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記 $(\lambda/N. A.)$ の0.8倍以下であることを特徴とする請求項3に記載の空間像計測方法。

【請求項5】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光及び前記パターンの種別を含む照明条件によって定まる解像限界のラインアンドスペースパターンのピッチである最小ピッチの半分の奇数倍であることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項6】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長を $\lambda$ 、前記投影光学系の開口数をN. A. として、 $\{\lambda/(2N. A.)\}$ の奇数倍として規定されることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項7】 前記光電変換信号をフーリエ変換して空間周波数分布を求め、該求めた空間周波数分布を前記スリットの既知の周波数スペクトルで割り返して元の空間像のスペクトル分布に変換し、該スペクトル分布を逆フーリエ変換することにより元の空間像を回復する工程を更に含むことを特徴とする請求項1～6のいずれか一項

に記載の空間像計測方法。

【請求項8】 投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、

照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第1方向に垂直な第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；前記光電変換信号に所定の処理を施して前記投影光学系の結像特性を求める工程と；を含む結像特性計測方法。

【請求項9】 前記パターンは、第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記光電変換信号の検出を、前記スリット板の前記光軸方向の位置を変化させつつ複数回繰り返し、  
前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と零次周波数成分の振幅比であるコントラストを求め、該コントラストが最大となる光電変換信号に対応する前記光軸方向の位置を検出することにより前記投影光学系のベストフォーカス位置を検出することを特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項10】 前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むことを特徴とする請求項9に記載の結像特性計測方法。

【請求項11】 前記投影光学系の光軸における前記ベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数の前記ラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、前記各パターンに対応する前記ベストフォーカス位置の差に基づいて前記投影光学系の球面収差を求める工程を更に含むことを特徴とする請求項9に記載の結像特性計測方法。

【請求項12】 前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、  
前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、  
前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれの位相を検出し、該位相検出の結果に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めるることを特徴とする請求項8に記載の結像特性計

測方法。

【請求項13】 前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項14】 前記パターンは、全体として矩形状で、前記第1方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項15】 前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求める特徴とする請求項14に記載の結像特性計測方法。

【請求項16】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各ラインパターンの線幅異常値を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項17】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号の前記各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、前記ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項18】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる少なくとも2種類のラインパターンを有する対称マークパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記パターンの空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項19】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測装置であって、前記パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記パターンを照明する照明装置と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な第2方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した $(\lambda/N. A.)$ 以下である、少なくとも1つのスリットを有するスリット板と；前記スリット板を透過した前記照明光を光電変換して、前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と；前記照明装置により前記パターンが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記像面近傍の前記2次元平面内で前記スリット板を前記第2方向に走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する処理装置と；を備える空間像計測装置。

【請求項20】 マスクに形成された回路パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光装置であって、前記基板を保持する基板ステージと；前記スリット板が前記基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項19に記載の空間像計測装置とを備える露光装置。

【請求項21】 前記空間像計測装置を用いて、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された前記光強度分布のデータに基づいて前記投影光学系の結像特性を求める制御装置を更に備える特徴とする請求項20に記載の露光装置。

【請求項22】 前記基板ステージ上のマークの位置を検出するマーク検出系と；前記空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置と前記マーク検出系との相対位置関係を検出する制御装置を更に備える特徴とする請求項20に記載の露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、空間像計測方法、結像特性計測方法、空間像計測装置及び露光装置に係り、更に詳しくは、投影光学系より像面に形成される空間像を計測する空間像計測方法、該空間像計測方法を利用して投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法、前記空間像計測方法を実行するための空間像計測装置、及び該空間像計測装置を備える露光装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来より、半導体素子又は液晶表示素子

等をフォトリソグラフィ工程で製造する際に、フォトマスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）のパターンを、投影光学系を介して表面にフォトレジスト等の感光剤が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に転写する投影露光装置、例えばステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパ）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパ）等が用いられている。

【0003】ところで、半導体素子等を製造する場合には、異なる回路パターンを基板上に幾層にも積み重ねて形成する必要があるため、回路パターンが描画されたレチクルと、基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンとを正確に重ね合わせることが重要である。かかる重ね合せを精度良く行うためには、投影光学系の結像特性が所望の状態に調整されることが必要不可欠である。

【0004】この投影光学系の結像特性の調整の前提として、結像特性を正確に計測する必要がある。この結像特性の計測方法として、所定の計測用パターンが形成された計測用マスクを用いて露光を行い、計測用パターンの投影像が転写形成された基板を現像して得られるレジスト像を計測した計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「焼き付け法」と呼ぶ）が、主として用いられている。この他、実際に露光を行うことなく、計測用マスクを照明光により照明し投影光学系によって形成された計測用パターンの空間像（投影像）を計測し、この計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「空間像計測法」と呼ぶ）も行われている。

【0005】従来の空間像計測は、概ね次のようにして行われていた。すなわち、例えば図38（A）に示されるように、正方形開口122が形成された開口板123を基板ステージ上に設置し、不図示の投影光学系によって形成された計測用レチクル上の計測用パターンの空間像M P'に対して、基板ステージを介して開口板123を矢印Aの方向に走査し、開口122を透過した照明光を光電変換素子によって受光して光電変換する。この光電変換により、図38（B）に示されるような光電変換信号（空間像に対応する光強度信号）が得られる。次に、この図38（B）に示されるような光電変換信号の波形を走査方向に対して微分することで図38（C）に示されるような微分波形を求める。そして、この図38（C）に示されるような微分波形に基づいてフーリエ変換法などの公知の所定の信号処理を施し、計測マークが投影された光学像（空間像）を求める。

【0006】かかる空間像の計測及びこれに基づく投影光学系のディストーション等の検出については、例えば、特開平10-209031号公報等などに詳細に開示されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の空間像計測方法にあっては、大きな開口を走査させて空間像強度を計測していたことから、図38（B）に示されるように、空間像のプロファイルを特徴付ける空間周波数成分以外に大きな低周波成分が混在する結果となってしまっていた。この一方、後段の信号処理系のダイナミックレンジには限りがあり、また、信号処理系のダイナミックレンジに対する分解能（例えば、現状では16ビット程度）が限られていることから、結果的に、空間像のプロファイルを反映した信号成分のS/N比が小さくならざるを得なかった。このため、ノイズに弱く、空間像から空間像強度信号に変換する際に像プロファイルの劣化が大きくなってしまい、十分な精度で空間像を計測することが困難であった。

【0008】この他、従来においても、主としてパターンの結像位置の検出を目的として、スリットをパターンの空間像に対して走査する装置が、例えば特開昭58-7823号などに開示されている。しかし、該公報に開示される装置では、スリット幅は、マスクパターン（基準パターン）の形状に対応して決定されていた。このため、種々の形状（大きさを含む）のパターンの空間像を正確に計測することは困難であった。

【0009】本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、十分な精度で空間像を計測することができる空間像計測方法及び空間像計測装置を提供することにある。

【0010】また、本発明の第2の目的は、投影光学系の結像特性を精度良く計測することができる結像特性計測方法を提供することにある。

【0011】また、本発明の第3の目的は、露光精度の向上を図ることができる露光装置を提供することにある。

【0012】

【課題を解決するための手段】一般に、露光装置に備えられる投影光学系の解像度（解像力）Rは、Rayleighの式で良く知られているように、 $R = k \times \lambda / N. A.$  の関係（λは照明光の波長、N. A. は投影光学系の開口数、kはレジストの解像力の他にプロセスによって決定される定数（プロセス係数）である）で表される。そこで、発明者は、かかる点に着目して、種々の実験等を行った結果、空間像計測に用いられる開口の走査方向の幅を、照明光の波長λ、投影光学系の開口数N. A. との少なくとも一方を考慮して定めることにより、空間像計測において良好な結果が得られることが判明した。本発明に係る空間像計測方法は、かかる発明者の得た新規知見に基づいてなされたものである。

【0013】請求項1に記載の発明は、投影光学系（P. L.）によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光（I. L.）によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影

光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板(90)を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む。

【0014】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。そして、この空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施すことにより、空間像(像強度の分布)を得ることができる。

【0015】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができる。この場合、スリットの走査方向の幅が照明光の波長を考慮して定められているので、十分な精度で空間像を計測することができる。

【0016】請求項2に記載の発明は、投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む。

【0017】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。そして、この空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施すことにより、

空間像(像強度の分布)を得ることができる。

【0018】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができる。この場合、スリットの走査方向の幅が投影光学系の開口数を考慮して定められているので、十分な精度で空間像を計測することが可能となる。

【0019】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項3に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した( $\lambda/N. A.$ )以下であることが望ましい。かかる場合には、解像力に影響を与える2つのパラメータである波長 $\lambda$ 及び開口数N. A. の両者を考慮してスリットの走査方向の幅が定められているので、請求項1及び2に記載の各発明に比べても一層精度良く空間像を計測することが可能になる。ここで、スリットの走査方向の幅が、( $\lambda/N. A.$ )以下であるとしたのは、第1に、発明者が、スリットの走査方向の幅(2Dとする)を、 $2D = f(\lambda/N. A.) = n \cdot (\lambda/N. A.)$ として、シミュレーション及び実験等を繰り返し行った結果、係数n=1とした場合に良好な結果(十分に実用的な結果)が得られたからであり、第2に、後述するように、上記の光電変換信号は、スリットと空間像の強度分布とのコンボリューションになるため、計測精度の面からは、スリットの走査方向の幅2Dは小さい程良いからである。

【0020】この場合において、請求項4に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記( $\lambda/N. A.$ )の0.8倍以下であることが一層望ましい。上述の如く、計測精度の面からは、スリット幅は小さい程良く、発明者が行ったシミュレーションと実験によれば、スリット幅2Dが $\lambda/(N. A.)$ の80%以下であれば、より一層実用的であることが確認された。

【0021】しかしながら、スループット面からの制約を考慮すると、2Dがあまりに小さいと、スリットを透過する光強度が小さくなりすぎて、計測が困難となるので、ある程度の大きさは必要である。

【0022】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項5に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光及び前記パターンの種別を含む照明条件によって定まる解像限界のラインアンドスペースパターンのピッチである最小ピッチの半分の奇数倍であることとしても良い。

【0023】ここで、コンベンショナル照明の下で、位相シフト法等を用いない通常パターンの場合、上記の最小ピッチは、ほぼ $\lambda/N. A.$ となり、位相シフトパターン、すなわち、位相シフト法を採用した位相シフトマスク(位相シフトレチクル)のパターンの場合には、最小ピッチは、ほぼ $\lambda/(2N. A.)$ となることが、確認されている。なお、位相シフトマスクとしては、ハーフ

フトーン型、レベンソン型などが挙げられる。

【0024】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項6に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長を $\lambda$ 、前記投影光学系の開口数をN. A. として、 $\{\lambda / (2N. A.)\}$ の奇数倍として規定されることとしても良い。

【0025】上記請求項1～6に記載の各発明において、請求項7に記載の発明の如く、前記光電変換信号をフーリエ変換して空間周波数分布を求め、該求めた空間周波数分布を前記スリットの既知の周波数スペクトルで割り返して元の空間像のスペクトル分布に変換し、該スペクトル分布を逆フーリエ変換することにより元の空間像を回復する工程を更に含むこととすることができる。

【0026】請求項8に記載の発明は、投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第1方向に垂直な前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；前記光電変換信号に所定の処理を施して前記投影光学系の結像特性を求める工程と；を含む。

【0027】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。この状態で、投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第1方向に垂直な第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施して投影光学系の結像特性を求める。

【0028】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができ、この得られた光電変換信号に所定の処理を施して投影光学系の結像特性を求めるので、投影光学系の結像特性を精度良く計測することが可能となる。

【0029】この場合において、請求項9に記載の発明の如く、前記パターンは、第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記光電変換信号の検出を、前記スリット板の前記光軸方向の位置を変化させつつ複数回繰り返し、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と零次周波数成分の振幅比であるコントラストを求め、該コントラストが最大となる光電変換信号に

対応する前記光軸方向の位置を検出することにより前記投影光学系のベストフォーカス位置を検出することとすることができる。上記コントラストは、フォーカス位置（デフォーカス量）に応じて敏感に変化するので、本発明によれば、投影光学系のベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測（決定）することができる。

【0030】この場合において、請求項10に記載の発明の如く、前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むこととすることができる。像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行い、その検出結果に基づいて統計的処理を行うことにより容易にかつ正確に像面を求めることが可能になる。

【0031】上記請求項9に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項11に記載の発明の如く、前記投影光学系の光軸における前記ベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数の前記ラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、前記各パターンに対応する前記ベストフォーカス位置の差に基づいて前記投影光学系の球面収差を求める工程を更に含むこととすることができる。球面収差は、光学系の開口収差の1つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が一点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡単に求めることができる。

【0032】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項12に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれの位相を検出し、該位相検出の結果に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることがと/orすることができる。

【0033】ここで、ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系の収差であり、ディストーションにより倍率誤差がある場合と同様に、パターン像が像面上

の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。

【0034】本発明によれば、位相検出の手法により、投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影されるパターンの空間像の位置ずれをそれぞれ精度良く求めることができるので、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。ここで、パターンは、第2方向の幅がスリットの第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むこととしたのは、パターンの第2方向の幅がスリットより小さいと、コマ収差等の他の収差の影響により、ディストーションを正確に測定することが困難になるからである。

【0035】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項13に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンである場合に、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めるこことすることができる。

【0036】本発明によれば、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影されるパターンの空間像の位置をそれぞれ精度良く求めることができ、結果的にディストーションを精度良く計測することができる。ここで、パターンは、第2方向の幅がスリットの第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むこととしたのは、請求項12の場合と同様の理由による。

【0037】上記請求項8に記載の結像特性計測方法において、請求項14に記載の発明の如く、前記パターンは、全体として矩形状で、前記第1方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであることとしても良い。かかる場合には、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像の検出が行われる際に、スリットがパターンの周期方向に垂直な方向に相対走査され、結果的に、そのパターンの全体形状と同形状の矩形パターンをスリットスキャンしたときと、同様の空間像の信号を得ることができる。これにより、例えば、最近のC M Pプロセスにおいて、ディッシングが生じるため形成が困難とされていた $10 \mu m$ 角のB O Xマーク（インナーB O Xマーク）パターンなどを実際に形成することなく、かかるマークパターンを用いたときと同等の空間像計測が可能となる。

【0038】この場合において、請求項15に記載の発

明の如く、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めるこことしても良い。

【0039】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項16に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各ラインパターンの線幅異常値を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めるこことすることができる。

【0040】コマ収差は、レンズの種々の輪帯で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系の主軸から離れた距離の画像の部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、ラインアンドスペースパターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出する本発明によれば、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測するここと可能となる。

【0041】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項17に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記所定の処理として、前記光電変換信号の前記各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、前記ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めるこことすることができる。空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、ラインアンドスペースパターンの各ラインパターンの空間像に対するコマ収差の影響と、ラインアンドスペースパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める本発明によれば、位相検出の手法により、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

【0042】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項18に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に所定間隔

で配置された線幅の異なる少なくとも2種類のラインパターンを有する対称マークパターンである場合、前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記パターンの空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求ることとができる。走査方向の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ずれする結果、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。従って、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、前記対称性マークパターンの空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める本発明によれば、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

【0043】請求項19に記載の発明は、投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測装置であって、前記パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記パターンを照明する照明装置(10)と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な第2方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A.で除した( $\lambda/N. A.$ )以下である、少なくとも1つのスリットを有するスリット板(90)と；前記スリット板を透過した前記照明光を光電変換して、前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子(24)と；前記照明装置により前記パターンが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記像面近傍の前記2次元平面内で前記スリット板を前記第2方向に走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する処理装置(20)と；を備える。

【0044】これによれば、照明装置によって所定のパターンが照明され、該パターンの空間像が投影光学系を介して像面上に形成される。そして、処理装置により、形成された空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる少なくとも1つのスリットを有するスリット板が像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査されるとともに、光電変換素子からの光電変換信号(走査中にスリットを透過した照明光を光電変換した電気信号)に基づいて空間像に対応する光強度分布が計測される。すなわち、このようにして、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像が計測される。また、この場合、スリット板に形成されたスリットの走査方向の幅が、( $\lambda/N. A.$ )以下であるので、上記請求項3と同様に、実用上十分な高い精度で空間像を計測することができる。

【0045】請求項20に記載の発明は、マスク(R)

に形成された回路パターンを投影光学系(PL)を介して基板(W)に転写する露光装置であって、前記基板を保持する基板ステージ(WST)と；前記スリット板(90)が前記基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項19に記載の空間像計測装置とを備える。

【0046】これによれば、スリット板が基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項18に記載の空間像計測装置を備えることから、例えば、マスクに種々の計測用パターンを形成し、基板ステージと一体でスリット板を移動させつつ、空間像計測装置により、種々の計測用パターンの空間像を高精度に計測することができる。従って、この計測結果を利用して、例えば投影光学系の結像特性の初期調整等を行うことにより、結果的に露光精度の向上が可能となる。

【0047】この場合において、請求項21に記載の発明の如く、前記空間像計測装置を用いて、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された前記光強度分布のデータに基づいて前記投影光学系の結像特性を求める制御装置(20)を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された光強度分布のデータに基づいて投影光学系の結像特性が求められる。そのため、必要なときに投影光学系の結像特性を求めることが可能となり、この求められた結像特性に応じて露光開始に先立って投影光学系の結像特性を調整することができる。従って、露光精度の向上が可能となる。

【0048】上記請求項20に記載の発明に係る露光装置において、請求項22に記載の発明の如く、前記基板ステージ上のマークの位置を検出するマーク検出系(ALG1又はALG2)と；前記空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置と前記マーク検出系との相対位置関係を検出する制御装置を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置、すなわち前記パターンの空間像の結像位置とマーク検出系との相対位置関係(すなわち、マーク検出系のいわゆるベースライン量)が検出される。この場合、ベースライン量の計測に当たり、マスクパターンの投影位置を、空間像計測装置により直接的に計測することができるので、基準マーク板とレチクル顕微鏡とを用いてマスクパターンの投影位置を間接的に計測する場合に比べて、精度の高いベースライン量の計測が可能である。従って、このベースライン量を用いて、露光時等に基板の位置を制御することにより、マスクと基板との重ね合せ精度の向上により露光精度の向上が可能となる。

【0049】

【発明の実施の形態】《第1の実施形態》以下、本発明の第1の実施形態を図1ないし図34に基づいて説明す

る。

【0050】図1には、第1の実施形態に係る露光装置100の概略的な構成が示されている。この露光装置100は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置、すなわちいわゆるスキャニング・ステッパーである。

【0051】この露光装置100は、光源及び照明光学系を含む照明系10、マスクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、投影光学系PL、基板としてのウエハWを保持してXY平面内を自在に移動可能な基板ステージとしてのウエハステージWST、及びこれらを制御する制御系等を備えている。

【0052】前記照明系10は、光源、照度均一化光学系(コリメータレンズ、フライアイレンズ等から成る)、リレーレンズ系、照明視野絞りとしてのレチクルブラインド及びコンデンサレンズ系等(いずれも図1では図示省略)を含んで構成されている。

【0053】前記光源としては、ここでは、一例として、KrFエキシマレーザ光(波長248nm)又はArFエキシマレーザ光(波長193nm)を出力するエキシマレーザ光源が用いられるものとする。

【0054】前記レチクルブラインドは、開口形状が固定の不図示の固定レチクルブラインドと開口形状が可変の可動レチクルブラインド12(図1では図示省略、図2参照)とから構成されている。固定レチクルブラインドは、レチクルRのパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルR上の長方形スリット状の照明領域IARを規定する矩形開口が形成されている。また、可動レチクルブラインド12は、固定レチクルブラインドの近傍のレチクルRのパターン面に対する共役面に配置され、走査露光時の走査方向(ここでは、図1における紙面直交方向であるY軸方向とする)及び非走査方向(図1における紙面左右方向であるX軸方向)にそれぞれ対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する。

【0055】照明系10によると、光源で発生した露光光としての照明光(以下、「照明光IL」と呼ぶ)は不図示のシャッターを通過した後、照度均一化光学系により照度分布がほぼ均一な光束に変換される。照度均一化光学系から射出された照明光ILは、リレーレンズ系を介して前記レチクルブラインドに達する。このレチクルブラインドを通過した光束は、リレーレンズ系、コンデンサレンズ系を通過して回路パターン等が描かれたレチクルRの照明領域(X軸方向に細長く伸びY軸方向の幅が所定幅の長方形スリット状の照明領域)IARを均一な照度で照明する。

【0056】なお、可動レチクルブラインド12は、走査露光の開始時及び終了時に主制御装置20によって制御され、照明領域IARを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。ま

た、本実施形態では、可動レチクルブラインド12が、後述する空間像計測器による空間像の計測の際の照明領域の設定にも用いられる。

【0057】前記レチクルステージRST上には、レチクルRが、例えば真空吸着(又は静電吸着)により固定されている。レチクルステージRSTは、ここでは、リニアモータ等を含む不図示のレチクルステージ駆動系により、後述する投影光学系PLの光軸AXに垂直なXY平面内で2次元的に(X軸方向及びこれに直交するY軸方向及びXY平面に直交するZ軸回りの回転方向(θz方向)に)微少駆動可能であるとともに、不図示のレチクルベース上をY軸方向に指定された走査速度で移動可能なとなっている。このレチクルステージRSTは、レチクルRの全面が少なくとも投影光学系PLの光軸AXを横切ることができるだけのY軸方向の移動ストロークを有している。

【0058】レチクルステージRST上には、レチクルレーザ干渉計(以下、「レチクル干渉計」という)13からのレーザビームを反射する移動鏡15が固定されており、レチクルステージRSTのXY面内の位置はレチクル干渉計13によって、例えば0.5~1nm程度の分解能で常時検出される。ここで、実際には、レチクルステージRST上には走査露光時の走査方向(Y軸方向)に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向(X軸方向)に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、レチクル干渉計13はY軸方向に1軸、X軸方向には2軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡15、レチクル干渉計13として示されている。

【0059】レチクル干渉計13からのレチクルステージRSTの位置情報は、ワークステーション(又はマイクロコンピュータ)から成る主制御装置20に送られ、主制御装置20ではレチクルステージRSTの位置情報に基づいてレチクルステージ駆動系を介してレチクルステージRSTを駆動制御する。

【0060】前記投影光学系PLは、レチクルステージRSTの図1における下方に配置され、その光軸AXの方向がZ軸方向とされ、ここでは両側テレセントリックな縮小系であり、光軸AX方向に沿って所定間隔で配置された複数枚のレンズエレメントから成る屈折光学系が使用されている。この投影光学系PLの投影倍率は、ここでは、一例として1/5となっている。このため、照明系10からの照明光ILによってレチクルR上のスリット状照明領域IARが照明されると、このレチクルRを通過した照明光ILにより、投影光学系PLを介してそのスリット状照明領域IAR内のレチクルRの回路パターンの縮小像(部分倒立像)が表面にフォトレジストが塗布されたウエハW上の前記照明領域IARに共役な露光領域IAに形成される。

【0061】前記ウエハステージWSTは、ステージベース16上面に沿って例えば磁気浮上型2次元リニアア

クチュエータから成る不図示のウエハステージ駆動系により、XY2次元面内（θz回転を含む）で自在に駆動されるようになっている。ここで、2次元リニアアクチュエータは、X駆動コイル、Y駆動コイルの他、Z駆動コイルをも有しているため、ウエハステージWSTは、Z、θx、θyの3自由度方向にも微少駆動が可能な構成となっている。

【0062】ウエハステージWST上には、ウエハホルダ25が載置され、このウエハホルダ25によってウエハWが真空吸着（又は静電吸着）によって保持されている。

【0063】なお、ウエハステージWSTに代えて、リニアモータあるいは平面モータ等の駆動系によってXY2次元面内でのみ駆動される2次元移動ステージを用いる場合には、ウエハホルダ25を、Z、θx、θyの3自由度方向にボイスコイルモータ等によって微少駆動されるZ・レベリングテーブルを介してその2次元移動ステージ上に搭載すれば良い。

【0064】前記ウエハステージWST上には、ウエハレーザ干渉計（以下、「ウエハ干渉計」という）31からのレーザビームを反射する移動鏡27が固定され、外部に配置されたウエハ干渉計31により、ウエハステージWSTのXY面内の位置が例えば0.5～1nm程度の分解能で常時検出されている。

【0065】ここで、実際には、ウエハステージWST上には、走査露光時の走査方向であるY軸方向に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向であるX軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、ウエハ干渉計31はY軸方向に1軸、X軸方向には2軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡27、ウエハ干渉計31として示されている。ウエハステージWSTの位置情報（又は速度情報）は主制御装置20に送られ、主制御装置20では前記位置情報（又は速度情報）に基づいて不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTのXY面内の位置を制御する。

【0066】また、ウエハステージWST上には、投影光学系PLの結像特性の計測に用いられる空間像計測器59が設けられている。ここで、この空間像計測器59の構成について詳述する。この空間像計測器59は、図2に示されるように、ウエハステージWSTの一端部上面に設けられた上部が開口した突設部58a部分に設けられている。この空間像計測器59は、突設部58aの開口を塞ぐ状態で上方から嵌め込まれた平面視長方形の受光ガラス82、この受光ガラス82の上面に形成され、その一部にスリット22が形成された遮光膜を兼ねる反射膜83、スリット22下方ウエハステージWST内部に配置されたレンズ84、86から成るリレー光学系、該リレー光学系（84、86）によって所定光路長分だけリレーされる照明光束（像光束）の光路を折り曲げる折り曲げミラー88（ここで、レンズ84、86、

及びミラー88によって受光光学系が構成される）、及び光電変換素子としての光センサ24等を含んで構成されている。

【0067】前記受光ガラス82の素材としては、ここでは、KrFエキシマレーザ光、あるいはArFエキシマレーザ光の透過性の良い、合成石英、あるいはホタル石などが用いられる。また、光センサ24としては、微弱な光を精度良く検出することが可能な光電変換素子（受光素子）、例えばフォトマルチプライヤなどが用いられる。なお、本実施形態では、受光ガラス82及び反射膜83によって、スリット板が形成されている。以下の説明においては、受光ガラス82と反射膜83とから成るスリット板を、適宜「スリット板90」と呼ぶものとする。また、前述の如く、スリット22は反射膜83に形成されているが、以下においては、便宜上スリット板90にスリット22が形成されているものとして説明を行う。

【0068】本実施形態では、後述する、レチクルRに形成された計測用パターンの投影光学系PLを介しての投影像（空間像）の計測の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによって空間像計測器59を構成するスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILが上記受光光学系（84、86、88）を介して光センサ24で受光され、該光センサ24からその受光量に応じた光電変換信号（光量信号）Pが主制御装置20に出力されるようになっている。

【0069】なお、光センサ24は、必ずしもウエハステージWSTの内部に設ける必要はなく、例えば、図3に示される空間像計測器59'の如く、光センサ24をウエハステージWSTの外部に配置しても良い。図3において、ウエハステージWSTには、その上面がウエハWの表面とほぼ同一面とされた2つの凸部58a、58bが設けられている。凸部58aには、図2の場合と同様にして構成されたスリット板90が設けられ、該スリット板90下方のウエハステージWSTの内部には、レンズ84、86及びミラー88が図2と同様の位置関係で配置されている。この場合、ウエハステージWSTの内部には、ライトガイド85も収納されている。このライトガイド85は、その入射端85aが、スリット22が形成された受光面に共役な位置に配置されている。また、このライトガイド85の射出端85bは、凸部58bの上面に固定された送光レンズ87のほぼ真下に配置されている。

【0070】送光レンズ87の上方には、該送光レンズ87に比べて大径の受光レンズ89が配置されている。この受光レンズ89の上方の射出端85bと共に位置には、光センサ24が配置されている。これら受光レンズ89及び光センサ24は、上記の位置関係を保ってケース92内に収納され、該ケース92は不図示の固定部

材に固定されている。

【0071】この図3の空間像計測器59'では、後述する、レチクルRに形成された計測用パターンの投影光学系PLを介しての投影像(空間像)の計測の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによって空間像計測器59'を構成するスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILがレンズ84、ミラー88及びレンズ86を介してライトガイド85の入射端85aに入射する。ライトガイド85で導かれた光は、その射出端85bから射出された後、送光レンズ87を介してウエハステージWSTの外部に導き出される。そして、そのウエハステージWSTの外部に導き出された光は、受光レンズ89を介して光センサ24によって受光され、該光センサ24からその受光量に応じた光電変換信号(光量信号)Pが主制御装置20に出力される。

【0072】この場合、計測用パターンの投影像の計測はスリットスキャン方式により行われるので、その際には、送光レンズ87に対して受光レンズ89及び光センサ24が、移動することになる。そこで、この空間像計測器59'では、所定の範囲内で移動する送光レンズ87を介した光がすべて受光レンズ89に入射するよう、各レンズの大きさが設定されている。

【0073】このように、空間像計測器59'では、スリット板90、レンズ84、86、ミラー88、ライトガイド85及び送光レンズ87により、スリット22を介した光をウエハステージWST外に導出する光導出部が構成され、受光レンズ89及び光センサ24によって、ウエハステージWST外へ導出された光を受光する受光部が構成されている。この場合、これら光導出部と受光部とは、機械的に分離されている。そして、空間像計測に際してのみ、光導出部と受光部とは、送光レンズ87と受光レンズ89とを介して光学的に接続される。

【0074】すなわち、空間像計測器59'では、光センサ24がウエハステージWSTの外部の所定位置に設けられているため、光センサ24の発熱に起因してレーザ干渉計31の計測精度等に悪影響を与えることがない。また、ウエハステージWSTの外部と内部とをライトガイド等により接続していないので、ウエハステージWSTの外部と内部とがライトガイドにより接続された場合のようにウエハステージWSTの駆動精度が悪影響を受けることもない。

【0075】なお、空間像計測器59(又は59')を構成するスリット板90上のスリット22の形状、寸法等、及び空間像計測器59(又は59')を用いて行われる空間像計測方法、結像特性の計測方法などについては、後に詳述する。

【0076】図1に戻り、投影光学系PLの側面には、ウエハW上のアライメントマーク(位置合わせマーク)を検出するマーク検出系としてのオフアクシス・アライ

メント顕微鏡ALG1が設けられている。本実施形態では、このアライメント顕微鏡ALG1として、画像処理方式のFIA(Filed Image Alignment)系のアライメントセンサが用いられている。このアライメント顕微鏡ALG1は、図2に示されるように、アライメント用光源32、ハーフミラー34、第1対物レンズ36、第2対物レンズ38、撮像素子(CCD)40等を含んで構成されている。ここで、光源32としては、ブロードバンドの照明光を出射するハロゲンランプ等が用いられる。このアライメント顕微鏡ALG1では、図4に示されるように、光源32からの照明光により、ハーフミラー34、第1対物レンズ36を介してウエハW上のアライメントマークMwを照明し、そのアライメントマーク部分からの反射光を第1対物レンズ36、ハーフミラー34、第2対物レンズ38を介して撮像素子40で受光する。これにより、撮像素子の受光面にアライメントマークMwの明視野像が結像される。そして、この明視野像に対応する光電変換信号、すなわちアライメントマークMwの反射像に対応する光強度信号が撮像素子40から主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光強度信号に基づき、アライメント顕微鏡ALGの検出中心を基準とするアライメントマークMwの位置を算出するとともに、その算出結果とそのときのウエハ干涉計31の出力であるウエハステージWSTの位置情報に基づいて、ウエハ干涉計31の光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

【0077】更に、本実施形態の露光装置100では、図1に示されるように、主制御装置20によってオンオフが制御される光源を有し、投影光学系PLの結像面に向けて多数のピンホールまたはスリットの像を形成するための結像光束を、光軸AXに対して斜め方向より照射する照射光学系60aと、それらの結像光束のウエハW表面での反射光束を受光する受光光学系60bとからなる斜入射光式の多点焦点位置検出系(フォーカスセンサ)が設けられている。主制御装置20では、投影光学系PLにフォーカス変動が生じた場合には、受光光学系60b内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系PLのフォーカス変動に応じて焦点位置検出系(60a、60b)にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行うようになっている。なお、本実施形態の焦点位置検出系(60a、60b)と同様の多点焦点位置検出系(フォーカスセンサ)の詳細な構成は、例えば特開平6-283403号公報等に開示されている。

【0078】主制御装置20では、後述する走査露光等に、受光光学系60bからの焦点ずれ信号(デフォーカス信号)、例えばSカーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるようにウエハステージWSTのZ位置及びピッチング量( $\theta_x$ 回転量)及びローリング量( $\theta_y$ 回転

量)を、不図示のウェハステージ駆動系を介して制御することにより、オートフォーカス(自動焦点合わせ)及びオートレベリングを実行する。

【0079】次に、本実施形態の露光装置100における露光工程の動作について簡単に説明する。

【0080】まず、不図示のレチクル搬送系によりレチクルRが搬送され、ローディングポジションにあるレチクルステージRSTに吸着保持される。次いで、主制御装置20により、ウェハステージWST及びレチクルステージRSTの位置が制御され、レチクルR上に形成された不図示のレチクルアライメントマークの投影像(空間像)が空間像計測器59を用いて後述するようにして計測され(図2参照)、レチクルパターン像の投影位置が求められる。すなわち、レチクルアライメントが行われる。

【0081】次に、主制御装置20により、空間像計測器59がアライメント顕微鏡ALG1の直下へ位置するように、ウェハステージWSTが移動され、アライメント光学系ALG1によって空間像計測器59の位置基準となるスリット22が検出される。図5には、このアライメント光学系ALG1によってスリット22が検出されている様子が示されている。主制御装置20では、このアライメント顕微鏡ALG1の検出信号及びそのときのウェハ干渉計31の計測値、並びに先に求めたレチクルパターン像の投影位置に基づいて、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント光学系ALG1との相対位置、すなわちアライメント顕微鏡ALG1のベースライン量を求める。

【0082】かかるベースライン計測が終了すると、主制御装置20により、例えば特開昭61-44429号公報などに詳細に開示されるEGA(エンハンスト・グローバル・アライメント)等のウェハアライメントが行われ、ウェハW上の全てのショット領域の位置が求められる。なお、このウェハアライメントに際して、ウェハW上の複数のショット領域のうちの予め定められた所定のサンプルショットのウェハアライメントマークMwがアライメント顕微鏡ALG1を用いて、前述した如くして計測される(図2参照)。

【0083】次いで、主制御装置20では、上で求めたウェハW上の各ショット領域の位置情報及びベースライン量に基づいて、干渉計31、13からの位置情報をモニタしつつ、ウェハステージWSTを第1ショット領域の走査開始位置に位置決めるとともに、レチクルステージRSTを走査開始位置に位置決めして、その第1ショット領域の走査露光を行う。

【0084】すなわち、主制御装置20では、レチクルステージRSTとウェハステージWSTとのY軸方向逆向きの相対走査を開始し、両ステージRST、WSTがそれぞれの目標走査速度に達すると、露光光ELによつてレチクルRのパターン領域が照明され始め、走査露光

が開始される。この走査露光の開始に先立って、光源の発光は開始されているが、主制御装置20によってレチクルブラインドを構成する可動ブラインドの各ブレードの移動がレチクルステージRSTの移動と同期制御されているため、レチクルR上のパターン領域外への露光光ELの照射が遮光されることは、通常のスキャニング・ステッパと同様である。

【0085】主制御装置20では、特に上記の走査露光時にレチクルステージRSTのY軸方向の移動速度VrとウェハステージWSTのX軸方向の移動速度Vwとが投影光学系PLの投影倍率に応じた速度比に維持されるようにレチクルステージRST及びウェハステージWSTを同期制御する。

【0086】そして、レチクルRのパターン領域の異なる領域が紫外パルス光で逐次照明され、パターン領域全面に対する照明が完了することにより、ウェハW上の第1ショット領域の走査露光が終了する。これにより、レチクルRの回路パターンが投影光学系PLを介して第1ショット領域に縮小転写される。

【0087】こうして第1ショット領域の走査露光が終了すると、ウェハステージWSTを第2ショット領域の走査開始位置へ移動させるショット間のステッピング動作を行う。そして、その第2ショット領域の走査露光を上述と同様にして行う。以後、第3ショット領域以降も同様の動作を行う。

【0088】このようにして、ショット間のステッピング動作とショットの走査露光動作とが繰り返され、ステップアンドスキャン方式でウェハW上の全てのショット領域にレチクルRのパターンが転写される。

【0089】ここで、上記の走査露光中には、投影光学系PLに一体的に取付けられたフォーカスセンサ(60a、60b)によってウェハW表面と投影光学系PL(その像面)との間隔、XY平面(像面)に対する傾斜が計測され、主制御装置20によってウェハW表面と投影光学系PLとの間隔、平行度が常に一定になるようにウェハステージWSTが制御される。

【0090】ところで、上記の走査露光中に、レチクルRのパターンとウェハW上のショット領域に既に形成されたパターンとが正確に重ね合わせられるためには、投影光学系PLの結像特性やベースライン量が正確に計測されていること、及び投影光学系PLの結像特性が所望の状態に調整されていることなどが重要である。

【0091】本実施形態では、上記の結像特性の計測に、空間像計測器59又は59'(以下、代表して「空間像計測器59」と記す)が用いられる。以下、この空間像計測器59による空間像計測、及び投影光学系PLの結像特性の計測等について詳述する。

【0092】図2には、空間像計測器59を用いて、レチクルRに形成された計測用パターンの空間像が計測されている最中の状態が示されている。レチクルRとして

は、空間像計測専用のもの、あるいはデバイスの製造に用いられるデバイスレチクルに専用の計測用マークを形成したものなどが用いられる。これらのレチクルの代わりに、レチクルステージRSTにレチクルと同材質のガラス素材から成る固定のマーク板（レチクルフィデューシャルマーク板とも呼ばれる）を設け、このマーク板に計測用マーク（計測用パターン）を形成したものを用いても良い。

【0093】ここで、レチクルRには、図2に示されるように、所定の箇所にX軸方向に周期性を有するラインアンドスペースマークから成る計測用パターンPMが形成されているものとする。また、空間像計測器59のスリット板90には、図6(A)に示されるように、Y軸方向に伸びる所定幅2Dのスリット22が形成されているものとする。なお、以下では、ラインアンドスペースを適宜「L/S」と略述する。

【0094】空間像の計測に当たり、主制御装置20により、可動レチクルブラインド12が不図示のブラインド駆動装置を介して駆動され、レチクルRの照明光ILの照明領域が計測用パターンPM部分のみに規定される

（図2参照）。この状態で、照明光ILがレチクルRに照射されると、図2に示されるように、計測用パターンPMによって回折、散乱した光（照明光IL）は投影光学系PLにより屈折され、該投影光学系PLの像面に計測用パターンPMの空間像（投影像）PM'が形成される。このとき、ウェハステージWSTは、空間像計測器59のスリット板90上のスリット22の+X側（又は-X側）に前記空間像PM'が形成される位置に設定されているものとする。このときの空間像計測器59の平面図が図6(A)に示されている。

【0095】そして、主制御装置20により、ウェハステージ駆動系を介してウェハステージWSTが図6(A)中に矢印Fで示されるように+X方向に駆動されると、スリット22が空間像PM'に対してX軸方向に走査される。この走査中に、スリット22を通過する光（照明光IL）がウェハステージWST内の受光光学系（又は図3の場合、光導出部及び受光レンズ）を介して光センサ24で受光され、その光電変換信号が主制御装置20に供給される。主制御装置20では、その光電変換信号に基づいて不図示の信号処理系を介して空間像PM'に対応する光強度分布を計測する。

【0096】図6(B)には、上記の空間像計測の際に

| 波長(nm) | 投影レンズの開口数 | (A)波長/投影レンズの開口数 | B=A×0.8 |
|--------|-----------|-----------------|---------|
| 248    | 0.68      | 364             | 291     |
| 248    | 0.75      | 331             | 264     |
| 193    | 0.65      | 297             | 238     |
| 193    | 0.75      | 257             | 206     |
| 193    | 0.85      | 227             | 182     |

【0106】上記表1からもわかるように、開口数、波長によって十分なスリット幅（開口サイズ：表1中のB）は異なるが、概略300nm以下が適切な値であ

得られる光電変換信号（光強度信号）Pの一例が示されている。

【0097】この場合、空間像PM'はスリット22の走査方向（走査露光時の走査方向ではなく、上記の空間像に対する走査方向、すなわちX軸方向）の幅（2D）の影響で像が平均化する。

【0098】従って、スリットをp(x)、空間像の強度分布をi(x)、観測される光強度信号をm(x)とすると、空間像の強度分布i(x)と観測される強度信号m(x)の関係は次の(1)式で表すことができる。この(1)式において、強度分布i(x)、強度信号m(x)の単位は単位長さ当たりの強度とする。

【0099】

【数1】

$$m(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x-u) \cdot i(u) du \quad \dots(1)$$

【0100】

【数2】

$$p(x) = \begin{cases} 1(|x| \leq D) \\ 0(|x| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

【0101】すなわち、観測される強度信号m(x)はスリットp(x)と空間像の強度分布i(x)のコンボリューションになる。

【0102】従って、計測精度の面からは、スリットの走査方向の幅（以下、単に「スリット幅」と呼ぶ）2Dは小さい程良い。

【0103】発明者は、スリット幅2Dを、照明光ILの波長λ、投影光学系PLの開口数N.A.の関数f(λ/N.A.)として、種々のシミュレーション及び実験等を繰り返し行った。その結果、スリット幅2D=n·(λ/N.A.)とし、かつ係数n≤1とした場合に、十分に実用的であり、特にn≤0.8であればより実用的であることが確認された。ここで、実用的であるとは、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化が少なく、光センサ24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミック・レンジが不要となり十分な精度が得られることを意味する。

【0104】上記の良好な結果の一例を示せば、例えば、次の表1のようになる。

【0105】

【表1】

る。この程度のスリットは市販のクロムレチクル（マスクブランクスとも呼ばれる。）を用いて製作可能である。

【0107】クロムレチクルは、通常100nm程度の膜厚のクロム膜が石英基板に蒸着されている。石英基板は、2. 286mm、3. 048mm、4. 572mm、6. 35mm厚のものが標準的である。

【0108】上述の如く、スリット幅2Dは、小さいほど良く、本実施形態のようにフォトマルチプライヤを光センサ24として用いる場合には、スリット幅が非常に小さくなっても走査速度を遅くして計測に時間を掛けねば光量（光強度）の検出は可能である。しかしながら、現実には、スループットの面から空間像計測時の走査速度には、一定の制約があるため、スリット幅2Dがあまりにも小さいと、スリット22を透過する光量が小さくなり過ぎて、計測が困難となってしまう。

【0109】発明者がシミュレーション及び実験等により得た知見によれば、スリット幅2Dの最適値は、露光装置の解像限界ピッチ（L/Sパターンのピッチ）の半分程度となることが確認された。これについては、後で更に詳述する。

【0110】これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、照明光学系10、空間像計測器59（スリット板90及び光センサ24を含む）、ウェハステージWST及び主制御装置20によって空間像計測装置が構成されている。また、この内、主制御装置20によって、空間像計測装置の一部を成す処理装置が構成されている。

【0111】上述した空間像計測装置及び空間像計測方法は、a. ベストフォーカス位置の検出、b. パターン像の結像位置の検出、c. アライメント顕微鏡ALGのベースライン計測等に用いられる。

【0112】本実施形態の露光装置100におけるc. ベースライン計測については既に説明したので、以下、上記a. ベストフォーカス位置の検出及びb. パターン像の結像位置の検出について、実施例を交えながら説明する。

〈ベストフォーカス位置の検出〉このベストフォーカス位置の検出は、例えばA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面（像面）の検出及びB. 球面収差測定などの目的に用いられる。

【0113】図7～図12には、ライン幅0.2μm、デューティ比50%のL/Sマークの空間像を前述した空間像計測方法により計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果が示されている。このシミュレーションの条件は、照明光の波長248nm、投影光学系のN.A.=0.68、照明のコヒーレンスファクタ=0.85で、スリット幅2D=0.3μmである。この条件は、表1のBの条件に近い。なお、図7～図12において、横軸はスリットのX位置（μm）を示し、縦軸は光強度（エネルギー値）を示す。

【0114】図7は、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す。この図7において、実線で示さ

れる波形P2は0.2μmL/Sの空間像で（1）式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査（空間像計測）によって得られる光強度信号で（1）式のm(x)に相当する。

【0115】図8は図7の強度信号P3、すなわちm(x)をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図8において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図8では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0116】図9はベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図9において、実線で示される波形P2は0.2μmL/Sの空間像で（1）式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査（空間像計測）によって得られる光強度信号で（1）式のm(x)に相当する。

【0117】図10は図9の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図10において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図10では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0118】図11はベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図11において、実線で示される波形P2は0.2μmL/Sの空間像で（1）式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査（空間像計測）によって得られる光強度信号で（1）式のm(x)に相当する。

【0119】図12は図11の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図12において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図12では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0120】図7と図9とを比較するとわかるように、0.2μmのデフォーカスによって明らかに像の形状が崩れている。また、図9と図11とを比較すると、デフォーカス量の増大に伴って明らかに像の形状がさらに崩れていることがわかる。

【0121】また、上述のように、光強度信号P3を周波数成分に分離すると、いろいろな信号処理が容易に行える。例えば、1次周波数成分P5と0次周波数成分P4との振幅比、すなわち(1次/0次)の振幅比であるコントラストに着目してみると、図8に示されるベストフォーカス位置の場合のコントラストは、0.43である。また、図10に示されるベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のコントラストは、0.24である。また、図12に示されるベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のコントラストは、0.047である。

【0122】このように、(1次/0次)の振幅比であるコントラストは、フォーカス位置によって敏感に変化するので強度信号からベストフォーカス位置を決定するのに便利である。すなわち、ベストフォーカス位置は(1次/0次)の振幅比であるコントラストが最大となるフォーカス位置を求ることによって検出可能である。

【0123】そこで、本実施形態では、次のようにして投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行う。

【0124】このベストフォーカス位置の検出には、例えば、ウエハ上でライン幅0.2μm(レチクル上で1μm)、デューティ比50%のL/Sマークが、計測用パターンPMとして形成された計測用レチクル(便宜上レチクルR'とする)が用いられる。このベストフォーカス位置の検出は、上述したシミュレーションと全く同じ条件の下で行われるものとする。

【0125】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR'がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR'上の計測用パターンPMが、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。

【0126】次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR'に照射して、前述と同様にして、ウエハステージWSTをX軸方向に走査しながら空間像計測器59を用いて、計測用パターンPMの空間像計測を前述と同様にスリットスキャン方式により行う。この際、主制御装置20では、スリット板90のZ軸方向の位置(すなわち、ウエハステージWSTのZ位置)を変化させつつ、複数回繰り返し、各回の光強度信号(光電変換信号)を内部メモリに記憶する。

【0127】そして、主制御装置20では、前記繰り返しにより得られた複数の光強度信号(光電変換信号)をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と0次周波数成分の振幅比であるコントラストを求める。そして、主制御装置20では、そのコントラストが最大となる光強度信号に対応するウエハステージWSTのZ

位置(すなわち、スリット板90のZ軸方向の位置)を検出し、この位置を投影光学系PLのベストフォーカス位置として決定する。前述の如く、コントラストは、フォーカス位置(デフォーカス量)に応じて敏感に変化するので、投影光学系PLのベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測(決定)することができる。

【0128】なお、2次以上の高次の次数の周波数成分の振幅は一般に小さく、電気的なノイズ、光学的なノイズに対する振幅が十分に取れない場合もあるが、S/N比(シグナル/ノイズ)の点で問題がない場合には高次の周波数成分の振幅比の変化を観測してもベストフォーカス位置を求めることができる。計測用パターンであるL/Sマークはライン幅とスペース幅が等しいデューティ比50%のパターンであることが望ましいが、それ以外のデューティ比のマークを用いることも可能である。発明者が実験等の結果得た知見によれば、L/Sマークのラインパターンの配列周期、すなわちマークピッチPmは、次の(3)式程度である場合に良好な結果が得られることが判明した。

【0129】

$$P_m = \lambda / N \cdot A \times (1 \sim 1.2) \quad \dots (3)$$

なお、上述したコントラストを用いる方法に限らず、光強度信号P((1)式のm(x))の微分値が最大となるZ位置(フォーカス位置)を検出する手法によってもベストフォーカス位置の検出が可能である。

【0130】また、投影光学系PLの像面形状の検出は、次のようにして行うことができる。

【0131】すなわち、この像面形状の検出に際しては、一例として図13に示されるように、パターン領域PA内に、前述した計測用パターンPMと同一寸法同一周期の計測用パターンPM1～PMnが形成された計測用レチクルR1が用いられる。

【0132】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR1がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR1の中央に存在する計測用パターンPMkが、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM1部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR1に照射して、前述と同様にして、スリットスキャン方式により空間像計測器59を用いて計測用パターンPM1の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0133】計測用パターンPM1を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM2部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照

明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測用パターンPM<sub>2</sub>の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0134】以後、主制御装置20では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測用パターンPM<sub>3</sub>～PM<sub>n</sub>について空間像の計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を繰り返し行う。

【0135】これにより得られた各ベストフォーカス位置Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、……、Z<sub>n</sub>に基づいて、所定の統計的処理を行うことにより、投影光学系PLの像面形状を算出する。

【0136】投影光学系PLの像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、このような手法により、像面形状を容易にかつ正確に求めることができる。

【0137】以上により、前述したA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面（像面）の検出を行うことができる。

【0138】また、投影光学系PLの球面収差の検出は、次のようにして行うことができる。

【0139】すなわち、この球面収差の検出に際しては、例えば、図14に示されるようにパターン領域PA内のX軸方向のほぼ中央に、Y軸方向に所定距離隔てて2つの計測用パターンPM1、PM2が形成された計測用レチクルR2が用いられる。計測用パターンPM1は、前述した計測用パターンPMと同一寸法同一周期のL/Sパターンである。また、計測用パターンPM2は、計測用パターンと同一寸法のラインパターンが異なる周期（例えば、計測用パターンPM1の周期（マークピッチ）の1.5～2倍程度）でX軸方向に並んだL/Sパターンである。

【0140】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR2がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR2上の計測用パターンPM1が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM1部分のみに照射されるように可動レチクルブライ

ンド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR2に照射して、前述と同様にして、スリットスキャン方式により空間像計測器59を用いて計測用パターンPM1の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0141】計測用パターンPM1を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM2部分に照射されるようレチクルステージRSTを-Y方向に所定距離移動する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測用パターンPM2の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0142】これにより得られた各ベストフォーカス位置Z<sub>1</sub>とZ<sub>2</sub>との差に基づいて、投影光学系PLの球面収差を演算により算出する。

【0143】球面収差は、光学系の開口収差の1つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が1点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のL/Sパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡単に求めることができる。なお、この場合のベストフォーカス位置の差の測定精度は3σ<20nm程度であることが実用上は必要である。

【0144】〈パターン像の結像位置の検出〉パターン像の結像位置の検出は、C. 投影光学系の倍率及びディストーション測定、D. 投影光学系のコマ収差測定、E. 照明テレンセン測定のそれぞれの目的で行われる。

【0145】計測用パターン（計測対象となるマーク）は目的によって様々である。分類すると次の表2のようになる。ここで、空間像計測に基づく、投影光学系の結像特性の計測結果は、前述した焼き付け法による結像特性の計測結果と基本的に一致することが望ましいので、表2では、焼き付け計測用マークとともに空間像計測用マーク（空間像計測用パターン）が示されている。

【0146】  
【表2】

| 目的                  | 焼き付け測定用マーク              | 空間像計測用マーク                        |
|---------------------|-------------------------|----------------------------------|
| C投影レンズ倍率・ディストーション測定 | Box in Box Mark、大L/Sマーク | Box in Box Mark、大L/Sマーク          |
| D投影レンズコマ収差測定        | Line in Box Mark、L/Sマーク | Line in Box Mark、L/Sマーク、大小L/Sマーク |
| E照明テレンセン測定          | Box in Box Mark、大L/Sマーク | Box in Box Mark、大L/Sマーク          |

【0147】次に、投影光学系PLの倍率及びディストーション測定について説明する。この投影光学系PLの倍率及びディストーション測定に際しては、例えば、図

15に示されるように、パターン領域PAの中心部及び4角の部分に、合計5個の150μm角（投影倍率1/5でウエハ面上では30μm角）の正方形マークから成

る計測用パターン $B M_1 \sim B M_5$ が形成された計測用レチクル $R 3$ が用いられる。また、この場合、空間像計測器 $5 9$ を構成するスリット板 $9 0$ 上には、図 $1 6$ に示されるような、 $X$ 軸方向に伸びる所定幅 $W$ 、長さ $L$ のスリット $2 2 a$ と、 $Y$ 軸方向に伸びる所定幅 $W$ 、長さ $L$ のスリット $2 2 b$ とが形成されているとともに、ウエハステージ $W S T$ の内部の受光光学系及び光センサ $2 4$ （又は図 $3$ の光導出部及び受光部）によりスリット $2 2 a$ 、 $2 2 b$ のいずれを透過した光をも受光が可能になっているものとする。ここで、 $W$ は例えば $0.3 \mu m$ であり、 $L$ は例えば $25 \mu m$ である。

【0148】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージ $R S T$ 上にレチクル $R 3$ がロードされる。次に、主制御装置 $2 0$ では、レチクル $R 3$ の中央に存在する計測用パターン $B M_1$ の中心が、投影光学系 $P L$ の光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージ $R S T$ を移動する。次に、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ が計測用パターン $B M_1$ を含む計測用パターン $B M_1$ より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド $1 2$ を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ をレチクル $R 3$ に照射する。これにより、図 $1 6$ に示されるように、計測用パターン $B M_1$ の空間像 $B M_1'$ 、すなわちほぼ $30 \mu m$ 角の正方形形状のパターン像が形成される。

【0149】この状態で、主制御装置 $2 0$ では、図 $1 6$ に矢印 $A$ で示されるように、ウエハステージ $W S T$ を $X$ 軸方向に走査しながら空間像計測器 $5 9$ を用いて計測用パターン $P M_1$ の空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号 $m(x)$ をメモリに記憶する。次に、主制御装置 $2 0$ では、得られた光強度信号 $m(x)$ に基づき、例えば公知の位相検出の手法により、計測用パターン $P M_1$ の結像位置を求める。ここで、この位相検出の手法としては、例えば、光強度信号 $m(x)$ をフーリエ変換して得られる1次周波数成分（これは、正弦波とみなせる）とこれと同一周波数の基準となる正弦波との積の例えば1周期分の和を求めるとともに、前記1次周波数成分とこれと同一周期の基準となる余弦波との積の例えば1周期分の和を求める。そして、得られた和同士を除算して得られた商の逆正接（アーカタンジェント）を求ることにより、1次周波数成分の基準信号に対する位相差を求め、この位相差に基づいて計測用パターン $P M_1$ の $X$ 位置 $x_1$ を求めるという一般的な方法を用いることができる。

【0150】次に、主制御装置 $2 0$ では、ウエハステージ $W S T$ を $Y$ 軸方向に走査しながら空間像計測器 $5 9$ を用いて計測用パターン $P M_1$ の空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号 $m(y)$ をメモリに記憶する。そして、上記と同様の位相検出の手法により、計測用パターン $P M_1$ の $Y$ 位置 $y_1$ を求める。そして、主制

御装置 $2 0$ では、得られた計測用パターン $P M_1$ の座標値 $(x_1, y_1)$ に基づいて、レチクル $R 3$ の光軸中心に対する位置ずれを補正する。

【0151】上記のレチクル $R 3$ の位置ずれの補正が終了すると、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ が計測用パターン $B M_2$ を含む計測用パターン $B M_2$ より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド $1 2$ を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測用パターン $B M_2$ の空間像計測及びその $X Y$ 位置の計測を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0152】以後、主制御装置 $2 0$ では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測用パターン $B M_3 \sim B M_5$ について空間像の計測及び $X Y$ 位置の計測を繰り返し行う。

【0153】これにより得られた計測用パターン $B M_2 \sim B M_5$ の座標値 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ 、 $(x_5, y_5)$ に基づいて、所定の演算を行うことにより、投影光学系 $P L$ の倍率及びディストーションの少なくとも一方を算出する。

【0154】ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系 $P L$ の収差であり、このディストーションにより倍率誤差がある場合と同様にパターン像が像面上の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。

【0155】従って、上述した倍率及びディストーションの計測方法によると、投影光学系 $P L$ のイメージフィールド内の異なる位置に投影される各計測用パターンの空間像の位置ずれを、位相検出の手法により、それぞれ精度良く求めることができるので、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。

【0156】但し、単一の $30 \mu m$ 角のパターン像 $B M_n'$ （ $n = 1, 2, \dots, 5$ ）をスリットスキャンしてもその像のエッジは2個所しかなく、計測精度が十分得られない場合もある。このような場合は、コマ収差の影響を受けることが殆ど無い程度の大きな $L/S$ パターン、例えば $5 \mu m$ 以上のライン幅の $L/S$ パターン（この空間像は、ライン幅 $1 \mu m$ の $L/S$ パターン像となる）から成る計測用パターン（便宜上「 $C M_1 \sim C M_5$ 」と呼ぶ）が、計測用パターン $B M_1 \sim B M_5$ に代えて形成されたレチクルを用いれば良い。図 $1 7$ には、このようなレチクルを用いて空間像計測を行う際に、スリット板 $9 0$ 上にその計測用パターン $C M_1 \sim C M_5$ の空間像 $C M_n'$ （ $n = 1, 2, \dots, 5$ ）が形成された状態が示されている。

【0157】なお、上では、位相検出の手法により、計測用パターンの空間像の位置ずれを計測するものとしたが、これに限らず、前述と同様に、スリットスキャン方式の空間像計測を投影光学系 $P L$ のイメージフィールド

内の異なる位置に投影される計測用パターン ( $B M_n$  又は  $C M_n$ ) の空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) について繰り返し行い、その繰り返しにより得られた複数の光強度信号  $m(x)$  (光電変換信号) それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて各光電変換信号に対応する空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) の位置 (エッジの位置) をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて投影光学系 PL のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求ることとしても良い。かかる場合には、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系 PL のイメージフィールド内の異なる位置に投影される空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) の位置をそれぞれ精度良く求めることができ、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。この場合、設定されたスライスレベルで各光強度信号が 2 値化され、そのスライスレベルの設定が適切な場合には、例えば図 7 の波形 P2 と P3 との関係から想像できるように、焼き付けにより実際に得られるレジスト像のエッジ位置を計測するのと等価となる。

【0158】ところで、現状の露光装置では、投影光学系のディストーション (倍率を含む) の管理は、基準ウエハを用いて次のようにして行われている。ここで、基準ウエハとは、投影光学系による露光領域内に  $30 \mu m$  角のアウター BOX マークを転写した後、現像工程を経てエッチングを行い、そのエッチング後にアウター BOX マークのエッジの位置を光波干渉式座標測定器などで予め計測しておいたものである。そして、露光装置のディストーション計測時にはエッチングされた  $30 \mu m$  角のアウター BOX マークの中心に、 $10 \mu m$  角のインナー BOX マークのレジスト像を焼き付け、相対位置をレジストレーション測定器などで計測する。

【0159】従って、ウエハ上 (像面上) で  $10 \mu m$  角の BOX マークの空間像をエッジ検出の手法により検出することにより、ディストーション計測を行えば、コマ収差の影響が基準ウエハを用いた上記のディストーション計測時と同等になり、相対的な差が発生しない。このため、上記の基準ウエハを用いたディストーション計測と同等な精度 (accuracy) でディストーションを空間像から計測できるようになる。

【0160】これを実現するために、前述したデバイスレチクルやレチクルフィデューシャルマーク板に  $50 \mu m$  角 (ウエハ上  $10 \mu m$  角) のインナー BOX マークを形成することが考えられる。しかるに、最近の CMP プロセスでは、ウエハ上  $10 \mu m$  角のマークはディッシングが生じるために入れられない。

【0161】そこで、発明者は、鋭意検討した結果、ウエハ上  $10 \mu m$  角の BOX マークの非計測方向 ( $10 \mu m$  である必要はない) をストライプ状に細分化したマーク (以下、適宜「擬似 BOX マーク」と呼ぶ) を用いて、空間像計測を行えば良いとの結論に達した。その理

由は、擬似 BOX マークは、いわゆる L/S パターンの一種であり、その周期方向に垂直な方向に空間像計測器をスキャンして、スリットスキャン方式により空間像計測を行えば、得られる信号波形は、BOX マークの空間像から得られる信号波形と同様の信号波形が得られるからである。

【0162】発明者は、図 15 に示される計測用レチクル R3 の計測用パターン  $B M_1$  ~  $B M_5$  に代えて、計測用パターンを X 方向に関してストライプ状に細分化した擬似ボックスパターンを形成した計測用レチクル R3' を用いて、前述と同様の手順でエッジ検出の手法による投影光学系 PL のディストーション計測を行った結果、各計測用パターンの Y 位置として、計測用パターン  $B M_n$  の Y 位置と同等の値となることが確認された。これより、Y 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンとが形成された計測用レチクルなどを用意し、それぞれの計測用パターンをスリット 22a, 22b で相対走査することにより、ディストーション計測を行うことができる。

【0163】図 18 には、上述した Y 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンその他の計測用パターンが形成されたマークブロック ( $300 \mu m$  角) の一例が示されている。この図 18 において、符号 MM1, MM2 は、例えば 5 本の  $5 \mu m$  L/S マークから成る倍率計測パターンであり、符号 MM3, MM4 は、例えば 29 本の  $1 \mu m$  L/S マークから成るフォーカス計測パターンであり、符号 MM5, MM6 は、例えば 11 本の  $2.5 \mu m$  L/S マークから成る擬似ボックスパターンである。この図 18 のマークブロックは、例えばデバイスレチクルやレチクルフィデューシャルマーク板に形成される。なお、擬似ボックスパターンの細分化は、例えば  $2.5 \mu m$  L/S 程度 (ウエハ上  $0.5 \mu m$  L/S 程度) 以下が望ましい。

【0164】次に、投影光学系のコマ収差の計測方法について説明する。コマ収差の計測は、L/S マークを計測用パターンとして用いる第 1 の方法と、Line in Box マークを計測用パターンとして用いる第 2 の方法とが代表的に挙げられる。

【0165】(第 1 の方法) 焼き付け法により、コマ収差を測定する場合に、解像限界付近の L/S マーク像の線幅異常値を用いる方法が知られている。ここで、線幅異常値とは、焼き付けによって形成されるレジスト像の非対称の度合いを表す指標となる値である。例えば、図 19 に示される  $0.2 \mu m$  L/S マーク (設計値) のレジスト像を例にとって説明すると、線幅異常値 A は、両端のラインパターンの線幅 L1, L5 を用いて、次の (4) 式のように定義される。

【0166】

【数3】

$$A = \frac{L1 - L5}{L1 + L5} \quad \dots(4)$$

【0167】Aは通常3%未満が投影光学系（投影レンズ）に望まれる性能である。

【0168】空間像計測においてもこのようなL/Sパターン像の線幅異常値を直接計測することが出来る。この場合は、先に説明したスライス法によるエッジ検出の手法を用いれば良いが、スライスレベルの決定に当たって、空間像に対応する光強度信号を適当な閾値（スレッショルドレベル）で2値化し、レジスト像の線幅に近づけるという簡単なレジスト像シミュレーションを行うことにより、その閾値をスライスレベルとして決定することが望ましい。

【0169】以下、この線幅異常値の計測によるコマ収差の計測方法について説明する。このコマ収差の計測には、例えば図20に示されるように、パターン領域PAの中心と4角の部分の合計5箇所に計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>が形成された計測用レチクルR4が用いられる。計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>としては、ライン幅1μm（ウエハ面上で0.2μm）でデューティ比50%のX軸方向に周期性を有するL/Sパターンが用いられる。また、この場合、空間像計測器59を構成するスリット板90及び空間像計測器59の構成等は、前述した倍率・ディストーション計測の際と同じ構成となっている。

【0170】この場合、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンDM<sub>2</sub>～DM<sub>5</sub>の空間像（DM<sub>2</sub>'～DM<sub>5</sub>'とする）に対する光強度信号m(x)を得る。

【0171】そして、この得られた各光強度信号m(x)と所定のスライスレベルとの交点をそれぞれ求め、その求められた交点のX座標から空間像DM<sub>2</sub>'～DM<sub>5</sub>'のそれぞれについて各ラインのライン幅を求め、このライン幅に基づいてそれぞれの線幅異常値を(4)式に基づいて算出し、この算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める。

【0172】コマ収差は、レンズの種々の輪帯で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系PLのイメージフィールド内の主軸から離れた部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、L/Sパターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出する上記方法によると、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測することが可能となる。

【0173】なお、各計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>が5本のラインパターンを含む単独のL/Sパターンであるため、線幅異常値の計測精度が不十分である場合には、

各計測用パターンとして、5本のL/Sパターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターンを、各計測用パターンとして用いても良い。図21には、このような複合マークパターンが計測用パターン（EMと呼ぶ）として用いられる場合に、スリット板90上に計測用パターンEMの空間像EM'が形成された様子が示されている。

【0174】この空間像EM'は、図22に示されるように、2つの基本的な周波数成分、すなわち光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する0.4μmピッチの周波数成分（第1基本周波数成分）f<sub>1</sub>と、各L/Sパターンの全体の幅に対応する第2基本周波数成分、すなわち、ここでは、各L/Sパターンの繰り返し周期（5本のマークからなるマークグループの配置ピッチ）である3.6μmピッチに対応する周波数成分f<sub>2</sub>とを有する。

【0175】従って、前述と同様に、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンEM<sub>2</sub>～EM<sub>5</sub>の空間像（EM<sub>2</sub>'～EM<sub>5</sub>'とする）に対する光強度信号m(x)を得た場合に、各光強度信号の第1基本周波数成分と、第2基本周波数成分との位相差を前述した位相検出の手法により算出し、該算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求ることとしても良い。

【0176】空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、L/Sパターンの各ラインパターンの空間像に対するコマ収差の影響と、L/Sパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、L/Sパターンの全体の幅に対応する第2基本周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める上記方法によると、位相検出の手法により、投影光学系PLのコマ収差を精度良く求めることができる。なお、この場合マークの配置ピッチ（上の例では0.4μm）と5本のマークからなるマークグループの配置ピッチ（上の例では3.6μm）の比率は整数倍とすることが信号処理上からは望ましい。

【0177】（第2の方法）次に、コマ収差の第2の測定方法について説明する。この方法では、図23(A)に示されるように、パターン領域PA内の中心及び4角の部分の合計5箇所に計測用パターンFM<sub>1</sub>～FM<sub>5</sub>が形成された計測用レチクルR5が用いられる。計測用パターンFM<sub>n</sub>（n=1, 2, …, 5）としては、図23(B)に拡大して示されるようなLine in Box Markと呼ばれるマークパターンが用いられる。このマークパターンは、図23(B)に示されるように、1辺がD1（例えばD1=150μm）の正方形パターンの内部に、同

心でかつ1辺がD2（例えばD2=100μm）の正方形のスペースパターン（幅D3）が形成されたマークパターンである。この計測用パターンFM<sub>n</sub>をウェハ上に焼き付け、現像すると、30μm角のレジスト残しマークの中心に20μm角の細溝が同時に形成される。細溝は（波長/N.A.）/2以下程度の太さとすることが望ましく、従ってD3は、その5倍以下程度とすることが望ましい。例えば、D3は、0.5μmとされる。

【0178】このマーク計測用パターンFM<sub>n</sub>を、コマ収差のある投影光学系で結像すると細線の方が太線よりも横ずれが大きく発生するため、細溝が偏心して対称性が崩れる。従って、その細溝の偏心量、すなわち対称性の崩れかたの程度を計測することにより、コマ収差の影響を知ることができる。

【0179】また、この場合、空間像計測器59を構成するスリット板90及び空間像計測器59の構成等は、前述した倍率・ディストーション計測の際と同じ構成となっている。

【0180】そこで、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンFM<sub>2</sub>～FM<sub>5</sub>の空間像（FM<sub>2</sub>’～FM<sub>5</sub>’とする）に対応する光強度信号m(x)を得る。

【0181】そして、各光強度信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて計測用パターンの空間像FM<sub>2</sub>’～FM<sub>5</sub>’の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める。

【0182】このようにスライス法を用いたエッジ検出の手法により、計測用パターンFM<sub>2</sub>～FM<sub>5</sub>の空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める上記方法によると、投影光学系PLのコマ収差を精度良く求めることができる。

【0183】上記の場合において、スリット板90上のスリット22a、22bの配置上、非計測方向のスリットが空間像と干渉する場合も考えられる。このような場合、上記計測用マークFM<sub>n</sub>に代えて、例えば線幅50μm程度の太いラインパターンと、例えば線幅0.5～0.75μm程度の細いラインパターンが計測方向に所定間隔（例えば、50μm程度）で並んだ左右対称の1次元マークを計測用パターンとして用いても良い。

【0184】図24には、このような計測用パターン（GM<sub>n</sub>とする）の空間像GM<sub>n</sub>’がスリット板90上に形成された状態が示されている。この図24において、D4は10μm、D5は0.1～0.15μmである。このような空間像GM<sub>n</sub>’に対応する光強度信号を、前述したスライス法によるエッジ検出の方法により検出することにより、投影光学系PLのコマ収差を検出しても良い。

【0185】走査方向（計測方向）の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ず

れする結果、計測用パターン（GM<sub>n</sub>）のように、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。

【0186】そのため、上記の空間像GM<sub>n</sub>’の対称性のずれを検出する方法によると、投影光学系PLのコマ収差を精度良く検出することができる。

【0187】勿論、この場合も、計測再現性を向上するため、図25のような繰り返し配置された計測用パターンの空間像HM’を検出することとしても良い。

【0188】次に、照明テレンセンの測定方法について説明する。

【0189】照明テレンセンは像位置がデフォーカスによって変化する量を測定して決定する。計測用パターンとしては、倍率、ディストーション測定と同様にコマ収差の影響を受けない大きなマークパターンが用いられる。焼きけ法による場合は、Box in Box Markあるいは大L/Sマークが用いられ、ベストフォーカス位置、+1μm程度のデフォーカス位置、-1μm程度のデフォーカス位置の3点で、それぞれ露光を行い、像位置とフォーカス位置の関係を計測し、照明テレンセン（=（像の横ずれ量/デフォーカス量））を計算することが行われる。

【0190】空間像計測の場合は、焼き付けと同様にコマ収差の影響を受けない大きなマークを用い、空間像の絶対位置を各フォーカス位置で計測し、照明テレンセンを計算する。

【0191】以上詳細に説明したように、本第1の実施形態の露光装置100によると、スリット幅2D=n・(λ/N.A.)、n≤0.8であるスリット板90を有する空間像計測器59を備えていることから、この空間像計測器を用いてレチクルあるいはレチクルフィデューシャルマーク板上の計測用パターンの空間像計測を行うことにより、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化の少ない高精度な空間像計測が可能となる。この場合、光センサ24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミック・レンジが不要となる。

【0192】また、露光装置100では、主制御装置20が、空間像計測器59を用いて前述のスリットスキャン方式による空間像の計測、及びこの計測結果を用いての前述したような投影光学系PLの種々の結像特性の計測を、高精度に行うことができる。そのため、この結像特性の計測結果に基づいて、例えば工場内における露光装置の立ち上げ時等に投影光学系PLの光学性能の調整を高精度に行うことができる。あるいは、特にディストーションや倍率等については、定期的に上記の計測を行い、この計測結果に基づいて投影光学系PLの不図示の結像特性補正装置（例えば、投影光学系を構成する特定のレンズエレメントをZ・チルト駆動する装置、あるい

は投影光学系を構成する特定のレンズ間に設けられた気密室の内圧を調整する装置など)を用いて、ディストーションや倍率(特に走査露光時の非走査方向)等を補正することができる。なお、走査露光時の走査方向の倍率の補正は、例えば、走査露光時のレチクルとウェハの少なくとも一方の走査速度を調整することにより行われる。

【0193】このように、露光装置100では、例えば投影光学系の結像特性の初期調整、あるいは、露光開始に先立って投影光学系の結像特性の調整により、高精度に結像特性が調整された投影光学系PLを用いて、露光が行われるので、結果的に露光精度の向上が可能となる。

【0194】また、露光装置100では、主制御装置20により、空間像計測器59を用いて、マーク検出系としてのアライメント顕微鏡ALG1のベースライン量の検出が精度良く行われるので、そのベースライン量を用いて、露光時等にウェハWの位置を制御することにより、レチクルとウェハとの重ね合せ精度の向上が可能であり、この点においても露光精度の向上が可能となってい。

【0195】なお、上記実施形態では、スリット幅2Dが、照明光の波長λと投影光学系PLの開口数N.A.との両者を考慮して決定されている場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。

【0196】すなわち、スリット幅2Dを、波長λ、開口数N.A.のいずれか一方のみを考慮して定めても良い。このようなスリット幅2Dのスリットを有するスリット板を備えた空間像計測器を用いても、上記実施形態と同様に、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像(像強度の分布)の精度の高い計測が可能である。

【0197】次に、スリット幅(2D)の決定に関して更に説明する。ここでは、一例として、フォーカス計測の場合を取り上げて好適なスリット幅の決定方法に関して説明する。

$$N \propto S^{1/2} \cdot D.O.F. \propto \lambda \cdot S^{1/2} / (N.A.)^2 \quad \dots (5)$$

の関係がある。ここで、N.A.は、投影光学系の開口数である。

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S^{1/2} / \lambda \propto \lambda \cdot S^{1/2} / P \quad \dots (6)$$

の関係が成り立つ。ここで、S/Nは、一次成分の振幅とノイズ振幅との比であるS/N比である。

【0204】(2) ダーク・ノイズが支配的な場合

ダーク・ノイズは1次成分の振幅Sに依存しない。1次

$$N \propto D.O.F. \propto \lambda / (N.A.)^2 \quad \dots (7)$$

の関係がある。

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S / \lambda \propto \lambda \cdot S / P \quad \dots (8)$$

の関係がある。

【0206】(6)、(8)式よりスリット幅(2D)を最適にする際には、波長と対象パターン・ピッチが決

【0198】前述の如く、投影光学系のベストフォーカス位置の計測は、スリット板90のZ軸方向(光軸方向)の位置を変化させつつ、計測用パターンの空間像計測をスリットスキャン方式により複数回繰り返し、これにより得られた光強度信号の(1次/0次)の振幅比であるコントラストが最大となるスリット板90のZ位置(コントラストピークのZ座標)を検出することにより求める。

【0199】通常、ベストフォーカスの検出に際しては、スリット板90を、0.15μmのピッチ間隔で、15段階(ステップ)程度変化させる。

【0200】ここで、図26を用いて上記のベストフォーカス検出の一例について説明する。この図26は、スリット板90を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点のコントラストの計測値(図26中の×印)を横軸をZ軸として示すものである。図26中に×印で示される13点のコントラストの計測値に基づいて、4次程度の近似曲線Cを最小二乗法によって求める。この近似曲線Cと、適当な閾値(スレッショルドレベル)SLとの交点を求め、交点間の距離=2Bの中点をベストフォーカスに対応するZ座標値とする。

【0201】図27には、図26と同様の線図が示されている。但し、この図27では縦軸は、1次成分の振幅(又は後述するファースト・オーダー)を示す。ここで、図27におけるWZ(=ステップピッチ×データ数)の範囲を固定にした時のフォーカス検出精度を考える。

【0202】(1) ショットノイズが支配的な場合  
1次成分の振幅をSとすると、ショットノイズはS<sup>1/2</sup>に比例する。1次周波数成分(以下、適宜「1次成分」と略述する)の振幅のZに関する曲線の平均傾きは焦点深度(DOF)に反比例するので、各1次成分の振幅のノイズがデータのZ方向へ及ぼす揺らぎをノイズNとすれば、

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S^{1/2} / \lambda \propto \lambda \cdot S^{1/2} / P \quad \dots (6)$$

【0203】しかるに、対象パターンの線幅をPとすると、P ∝ λ / N.A.の関係があるので、

成分の振幅のZに関する曲線の平均傾きはDOFに反比例するので、各1次成分の振幅のノイズがデータのZ方向へ及ぼす揺らぎをノイズNとすれば、

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S / \lambda \propto \lambda \cdot S / P \quad \dots (8)$$

定していれば、1次成分の振幅Sのみに着目すれば良

く、S/N比は、ノイズの性質によって1次振幅Sの0.5~1乗に比例することがわかる。

【0207】図28 (A) ~図31 (B) には、スリット幅 (2D) の好ましい範囲を求めるためのシミュレーション結果の一例が示されている。このうち、図28 (A)、図29 (A)、図30 (A) 及び図31 (A) は、N. A. = 0.68、 $\lambda = 248\text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$  の条件の場合を示す。また、図28 (B)、図29 (B)、図30 (B) 及び図31 (B) は、N. A. = 0.85、 $\lambda = 193\text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$  の条件の場合を示す。

【0208】図28 (A)、(B) は、フォトマルチプライヤを用いた例を想定して (6) 式を適用した場合のフォーカス検出に関する S/N 比を示す。図28 (A) において、実線 (●)、破線 (■)、点線 (▲) は、計測用パターンとして、ライン幅 L がそれぞれ 200 nm、220 nm、250 nm で、デューティ比がいずれも 50% の L/S パターンを用いた場合を、それぞれ示す。図28 (B) において、実線 (●)、破線 (■)、点線 (▲) は、計測用パターンとして、ライン幅 L がそれぞれ 120 nm、130 nm、140 nm で、デューティ比がいずれも 50% の L/S パターンを用いた場合を、それぞれ示す。

【0209】図29 (A)、(B) は、図28 (A)、(B) にそれぞれ対応するコントラストを示す。コントラストは、スリット幅が小さいほど大きくなる。0次の振幅はスリット幅に比例するので、コントラストに 0.

$$m(x) = \int_{x-D}^{x+D} i(t) dt \quad \dots(9)$$

【0216】フォーカス検出は解像限界の L/S の強度像の 0 次、1 次の比 (コントラスト) より計算する。空間像の強度像に含まれる 0 次成分の強度を a、1 次成分の強度を b  $\cdot \sin(\omega_1 \cdot x)$  とすれば、観測されるスリット透過強度  $m_0(x)$ 、 $m_1(x)$  は次の (10)、(11) 式のようになる。但し、 $\omega_1$  は、解像限界の空間周波数である。

【0217】

【数5】

$$m_0(x) = a \int_{x-D}^{x+D} dt = 2aD \quad \dots(10)$$

$$\omega_1 D = \pi / 2 \cdot (2n - 1)$$

(但し、 $n = 1, 2, 3, \dots$ )

【0221】(12) 式を満足するとき、 $D = \pi / (2\omega_1)$  の奇数倍のときに、1 次成分のゲインが最大となる (コントラストが最大となる) ので、スリット幅 2D が  $\pi / \omega_1$  の奇数倍となるとき、すなわち最小マークピッチの半分 (以下、適宜「最小ハーフピッチ」と呼ぶ) の奇数倍であることが望ましい。

【0222】また、1 次成分のゲインが高く、0 次成分のゲインが低いほど電気系のダイナミックレンジは楽になるので、結局、(12) 式で  $n = 1$  の場合、すなわち

3  $\mu\text{m}$  を基準としたスリット幅の比率を乗じたものがファースト・オーダー (1st Order) である。これは 1 次成分の振幅に比例する。

【0210】図30 (A)、(B) には、図28 (A)、(B) にそれぞれ対応するファースト・オーダーが、示されている。

【0211】図28 (A)、(B) から、結果的にいずれの波長、線幅の場合でも、フォーカス検出に最適なスリット幅 (2D) は、パターンピッチ (= 2L) の半分と同じ長さが最適であることが判明した。ピッチに関しては小さい程良いが、勿論解像限界以内であることが必須である。従って、スリット幅の最適値は露光装置の解像限界ピッチの半分程度となる。

【0212】図31 (A)、(B) は、図28 (A)、(B) と同一条件で、(8) 式を適用した場合のフォーカス検出に関する S/N 比を示す。

【0213】ここで、スリット幅 2D の最適化について、更に別の観点から説明する。

【0214】空間像計測器のスリットの幅 2D、空間像の強度分布を  $i(x)$  とするとスリット透過強度  $m(x)$  は、前述した (1) 式を一般化した次の (9) 式で表される。

【0215】

【数4】

【0218】

【数6】

$$m_1(x) = b \int_{x-D}^{x+D} \sin(\omega_1 t) dt = \frac{2b}{\omega_1} \sin(\omega_1 x) \cdot \sin(\omega_1 D) \quad \dots(11)$$

【0219】(10) 式より、0 次成分はスリット幅に単純に比例し、(11) 式より 1 次成分は、次の (12) 式の条件を満足するときに最大になる。

【0220】

..... (12)

スリット幅 2D が  $\pi / \omega_1$  の場合、換言すれば最小ハーフピッチと一致する場合が最良である。

【0223】図32 (A)、(B) には、スリット幅 2D が最小ハーフピッチの 1 倍のとき、3 倍のときの、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線 LL1 はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線 LL2 はその微分信号を示し、破線 LL3 は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

【0224】図33(A)、(B)には、スリット幅2Dが最小ハーフピッチの5倍のとき、7倍のときの、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線LL1はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線LL2はその微分信号を示し、破線LL3は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

【0225】図32(A)、(B)及び図33(A)、(B)において微分信号LL1の振幅は、同一振幅となっていることがわかる。但し、スリット幅2D=最小ハ

ーフピッチ×nのnが1、3、5、7と大きくなるに従って、信号処理系(光センサ以降の処理系)により大きなダイナミックレンジが必要となることがわかる。これより、スリット幅2Dが最小ハーフピッチに一致する場合が最良であることがわかる。

【0226】また、前述した(1)、(2)式をフーリエ変換すると、スリットによる平均化効果の周波数特性が判明する。

【0227】

10 【数7】

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \exp(-2\pi ux) dx = 2D \frac{\sin(2\pi uD)}{2\pi uD} = 2D \frac{\sin(\omega D)}{\omega D} \quad \dots(13)$$

【0228】図34には、解像限界の空間周波数を $\omega_1$ として、スリット幅2Dが解像限界のハーフピッチの1、3、5倍の時の周波数特性が示されている。この図34において、符号GF5、GF3、GF1は、それぞれ、スリット幅が最小ハーフピッチの5倍、3倍、1倍の場合の周波数特性線図を示す。この図34から明らかのように、ゲイン(利得)の安定性の面でも、スリット幅が最小ハーフピッチに一致する場合(GF1)が、最良であることがわかる。

【0229】《第2の実施形態》次に、本発明の第2の実施形態について図35及び図36に基づいて説明する。ここで、前述した第1の実施形態に係る露光装置100と同一若しくは同等の構成部分については、同一の符号を用いるとともに、その説明を簡略化し若しくは省略するものとする。

【0230】図35には、この第2の実施形態に係る露光装置の構成が一部省略されて示されている。この露光装置110は、マーク検出系としてのアライメント光学系ALG2の構成のみが、露光装置100と相違する。そこで、以下においては、この相違点を中心として説明する。

【0231】このアライメント光学系ALG2は、図35に示されるように、投影光学系PLの側面に設けられたオフアクシス方式のレーザ・スキャン式アライメントセンサである。

【0232】このアライメント光学系ALG2は、図35に示されるように、アライメント用光源132、ハーフミラー134、第1対物レンズ136、第2対物レンズ138、シリコンフォトダイオード(SPD)140等を含んで構成されている。ここで、光源132としては、ヘリウム・ネオンレーザが用いられる。このアライメント顕微鏡ALG2では、図35に示されるように、光源132からレーザビームが、ハーフミラー134、第1対物レンズ136を介してウエハW上のアライメントマークMwを照明するためのレーザビームスポットを

形成する。レーザビームは通常固定されており、ウエハステージWSTを走査(スキャン)することによってレーザビームとアライメントマークMwとを相対走査する。

20 【0233】アライメントマークMwから発生する散乱光は第1対物レンズ136、ハーフミラー134、及び第2対物レンズ138を介してシリコン・フォトダイオードSPD140上に集光されて受光される。顕微鏡ALG2には、0次光フィルタが挿入されており暗視野になっており、アライメントマークMwの存在する位置だけで散乱光が検出される。そして、SPD140が受光した光の光電変換信号がSPD140から主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光電変換信号と、そのときのウエハ干渉計31の出力であるウエハステージWSTの位置情報に基づいて、干渉計光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

【0234】このようなステージスキャン・タイプのレーザ・スキャン式アライメントセンサのベースラインの安定性は、レーザのビーム位置の安定性と干渉計の安定性、及びSPD～電気系のゲインの安定性によって決定する。

【0235】ここで、このアライメント顕微鏡ALG2のベースラインの計測について説明する。前提として、40 レチクルRがレチクルステージRST上に搭載されているものとする。

【0236】まず、主制御装置20では、前述と同様にして、レチクルR上に形成されたレチクルアライメントマークPMの投影像を、空間像計測器59を用いて計測し、レチクルパターン像の投影位置を求める。すなわち、レチクルアライメントを行う。

【0237】次に、主制御装置20では、ウエハステージWSTを移動して、図36に示されるように、レーザビームスポットに対して空間像計測器59のスリット22を走査し、レーザ光の透過光の強度信号と同時にウエ

ハ干渉計31の計測値を取り込み、レーザビームプロファイルを得、それに基づいてビームスポットの位置を求める。これにより、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント光学系ALG2のレーザスポット照射位置との相対位置、すなわちアライメント顕微鏡ALG2のベースライン量を求める。

【0238】以上説明した本第2の実施形態に係る露光装置110によると、前述した第1の実施形態の露光装置100と、同等の効果を得ることができる。また、この場合も、主制御装置20により空間像計測器59を用いて、アライメント顕微鏡ALG2のベースライン量が検出されるが、このベースライン量の検出に当たり、レチクルパターン像の投影位置及びアライメント顕微鏡ALG2の位置を、空間像計測器59により直接的に計測することができるので、精度の高いベースライン量の計測が可能である。

【0239】なお、空間像計測器59のスリット板90上のスリットの配置は、前述したものに限らず、例えば図37(A)に示されるように、前述したスリット22a、22bの組みに加え、X軸に対して45°、135°を成す方向にそれぞれ伸びるスリット22c、22dの組みを加えても良い。勿論、これらのスリット22c、22dの長手方向に垂直な方向のスリット幅2Dは、スリット22a、22bと同様の基準により同様の寸法に定められる。

【0240】この場合、図37(A)に示されるように、矢印C方向に空間像計測器59(ウェハステージWST)を走査しつつ、例えば図37(A)に示される空間像PM'に対してスリット22dを走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。また、図37(B)に示されるように、矢印D方向に空間像計測器59(ウェハステージWST)を走査しつつ、例えば図37(B)に示される空間像PM'に対してスリット22cを走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。

【0241】なお、上記の2組のスリット(22a, 22b)、(22c, 22d)をスリット板90上に設ける場合、それら各組のスリットがある程度離して配置されるため、ウェハステージWST内部の受光光学系及び光センサの構成として、各組のスリットを光学的あるいは電気的な選択機構によって選択できる構成を採用しても良い。具体的には、シャッタで光路が切り替え可能な受光光学系と単一の光電変換素子とを組み合わせても良いし、受光光学系及び光電変換素子を各組のスリットに対してそれぞれ設けても良い。

【0242】次に、像回復について説明する。

【0243】前述した(1)、(2)式より、スリットスキャンによる平均化は、空間周波数的にはp(x)のフーリエ変換によりどのようなスペクトルかが判明す

る。これは一般に装置関数P(u)と呼ばれている。装置関数は前述した(13)式で示される。

【0244】(13)式の周波数特性の逆特性のフィルタP\_inv(u)は次の(14)式で示され、これを観測される空間像の強度信号m(x)のフーリエスペクトルに乗じてから逆フーリエ変換を行えば像回復が行われる。

$$P_{inv}(u) = 1/P(u) \quad \dots (14)$$

10 インコヒーレント結像の光学的伝達関数(OTF)の上限が2N.A. / λであるから完全な像回復のためには次の(15)式を満たす必要がある。

【0245】

【数8】

$$D < \frac{\lambda}{4N.A.} \quad \dots (15)$$

【0246】以上のような像回復の手法を用いれば、非常に細い孤立線の像プロファイルも回復できる。孤立線は様々な周波数成分を含んでおり、孤立線の空間像を複数のフォーカスで計測し、これらを用いてレンズの波面収差を計測することも考えられる。

【0247】また、繰り返しパターンであるL/Sマークを像回復することで、レンズの離散的な周波数成分の波面収差を測定することも考えられる。

【0248】これらの波面収差の測定に際しての空間像計測には、例えば図37(A)に示される4方向についての空間像の計測が可能な空間像計測器59を用いることが望ましい。

【0249】なお、上記各実施形態では、本発明がステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、マスクと基板とを静止した状態でマスクのパターンを基板に転写するとともに、基板を順次ステップ移動させるステップ・アンド・リピート型の露光装置にも本発明は適用することができる。

【0250】また、上記各実施形態では、本発明が半導体製造用の露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッドを製造するための露光装置などにも本発明は広く適用できる。

【0251】また、上記各実施形態では、露光用照明光としてKrFエキシマレーザ光(248nm)、ArFエキシマレーザ光(193nm)などを用いる場合について説明したが、これに限らず、g線(436nm)、i線(365nm)、F2レーザ光(157nm)、銅蒸気レーザ、YAGレーザの高調波等を露光用照明光として用いることができる。

【0252】また、上記各実施形態では、投影光学系として縮小系を用いる場合について説明したが、これに限

らず、投影光学系として等倍あるいは拡大系を用いても良い。

【0253】また、ウエハステージやレチクルステージにリニアモータ（米国特許第5, 623, 853号又は米国特許第5, 528, 118号の公報参照）を用いる場合は、エアベアリングを用いたエア浮上型およびローレンツ力又はリアクタンス力を用いた磁気浮上型のどちらを用いても良い。

【0254】また、ステージは、ガイドに沿って移動するタイプでも良いし、ガイドを設けないガイドレスタイプでも良い。

【0255】ウエハステージの移動により発生する反力は、特開平8-166475号公報（米国特許第5, 528, 118号）に記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。

【0256】レチクルステージの移動により発生する反力は、特開平8-330224号公報（米国特許出願シリアルナンバー416558号）に記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。

【0257】複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み光学調整をするとともに、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整（電気調整、動作確認等）することにより本実施形態の露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

【0258】半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、この設計ステップに基づいたレチクルを製作するステップ、シリコン材料からウエハを製作するステップ、前述した実施形態の露光装置によりレチクルのパターンをウエハに転写するステップ、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む）、検査ステップ等を経て製造される。

#### 【0259】

【発明の効果】以上説明したように、本発明に係る空間像計測方法及び空間像計測装置によれば、十分な精度で空間像を計測することができるという効果がある。

【0260】また、本発明に係る結像特性計測方法によれば、投影光学系の結像特性を精度良く計測することができるという従来にない優れた効果がある。

【0261】また、本発明に係る露光装置によれば、露光精度の向上を図ることができるという効果がある。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施形態に係る露光装置100の概略的な構成を示す図である。

【図2】図1のアライメント顕微鏡及び空間像計測器の内部構成を示す図である。

【図3】光センサをウエハステージの外部に配置した空間像計測器の変形例を示す図である。

【図4】アライメント顕微鏡によりウエハ上のアライメントマークを検出している様子を示す図である。

【図5】アライメント顕微鏡のベースラインの計測に際して、アライメント顕微鏡により空間像計測器のスリットを検出している状態を示す図である。

【図6】図6（A）は、空間像の計測に際してスリット板上に空間像PM'が形成された状態の空間像計測器を示す平面図、図6（B）はその空間像計測の際に得られる光電変換信号（光強度信号）Pの一例を示す線図である。

【図7】ライン幅0.2μm、デューティ比50%のL/Sマークの空間像を計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果を示す線図であって、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す線図である。

【図8】図7の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図9】ベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図である。

【図10】図9の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図11】ベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図である。

【図12】図11の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図13】像面形状の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図14】球面収差の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図15】倍率及びディストーション測定に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図16】倍率及びディストーション測定に際して用いられる空間像計測器59を示す平面図である。

【図17】大きなL/Sパターンから成る計測用パターンが形成されたレチクルを用いて空間像計測を行う際に、スリット板上にその計測用パターンの空間像C<sub>Mn'</sub>が形成された状態の空間像計測器を示す平面図である。

【図18】擬似ボックスパターンその他の計測用パターンが形成されたマークブロックの一例を示す図である。

【図19】コマ収差の第1の計測方法を説明するための図であって、レジスト像の一例を示す図である。

【図20】コマ収差の第1の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図21】5本のL/Sパターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターンを、各計測用パターンとして用いた場合にその空間像EM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図22】図21に示される空間像EM'が、2つの基本的な周波数成分を有することを説明するための図である。

【図23】図23(A)はコマ収差の第2の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図、図23(B)は図23(A)の各計測用パターンを拡大して示す図である。

【図24】線幅の太いラインパターンと線幅の細いラインパターンが計測方向に所定間隔で並んだ左右対称の1次元マークから成る計測用パターンの空間像GM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図25】図24の場合の1次元マークが繰り返し配置された計測用パターンの空間像HM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図26】スリット板を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点のコントラストの計測値(×印)を横軸をZ軸として示す図である。

【図27】スリット板を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点の1次成分の振幅の値(×印)を横軸をZ軸として示す図である。

【図28】図28(A)、(B)は、それぞれ所定条件の下で、フォトマルチプライヤを用いた例を想定して(6)式を適用した場合の、フォーカス検出に関するS/N比を示すグラフである。

【図29】図29(A)、(B)は、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するコントラストを示すグラフである。

【図30】図30(A)、(B)は、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するファースト・オーダーを示すグラフである。

【図31】図31(A)、(B)は、図28(A)、(B)と同一条件で、(8)式を適用した場合のフォーカス検出に関するS/N比を示すグラフである。

【図32】図32(A)、(B)は、スリット幅が最小ハーフピッチの1倍のとき、3倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図である。

【図33】図33(A)、(B)は、スリット幅が最小ハーフピッチの5倍のとき、7倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図である。

【図34】スリット幅が解像限界のハーフピッチの1、3、5倍の時の周波数特性を示す図である。

【図35】第2の実施形態に係る露光装置の構成を一部省略して示す図である。

【図36】第2の実施形態の露光装置において、アライメント顕微鏡ALG2のベースライン計測に際して、レーザビームスポットの位置を空間像計測器を用いて計測しているときの状態を示す図である。

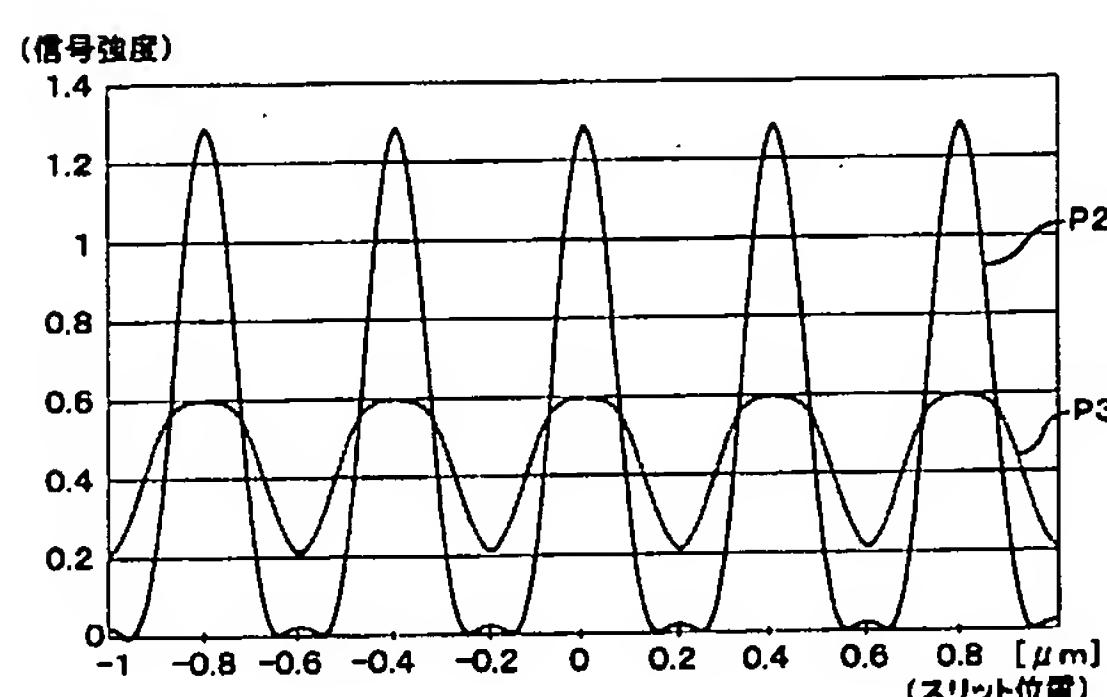
【図37】空間像計測器のスリット板上のスリットの他の配置例、及びそのようなスリットが形成された空間像計測器の使用方法を説明するための図である(図37(A)、(B))。

【図38】従来の空間像計測方法について説明するための図である(図38(A)～(C))。

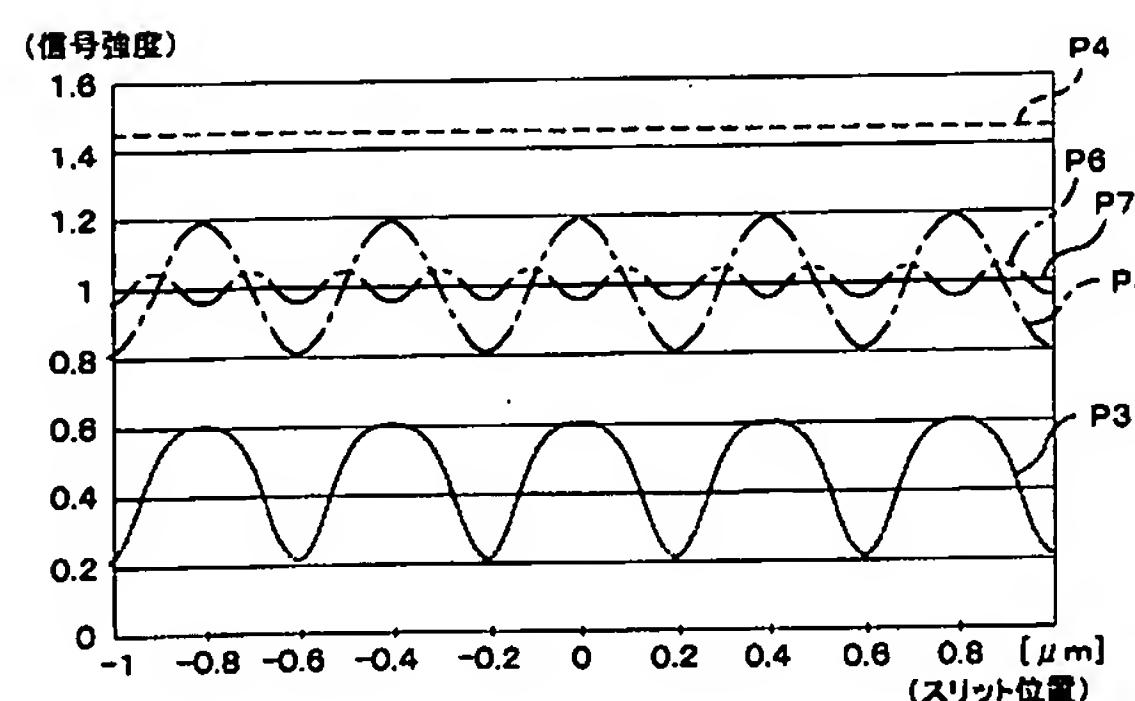
#### 【符号の説明】

10…照明系(照明装置、空間像計測装置の一部)、20…主制御装置(制御装置、処理装置、空間像計測装置の一部)、22a～22d…スリット(空間像計測装置の一部)、24…光センサ(光電変換素子、空間像計測装置の一部)、90…スリット板(空間像計測装置の一部)、100…露光装置、PL…投影光学系、IL…照明光、R…レチクル(マスク)、W…ウエハ(基板)、WST…ウエハステージ(基板ステージ)、ALG1、ALG2…アライメント顕微鏡(マーク検出系)。

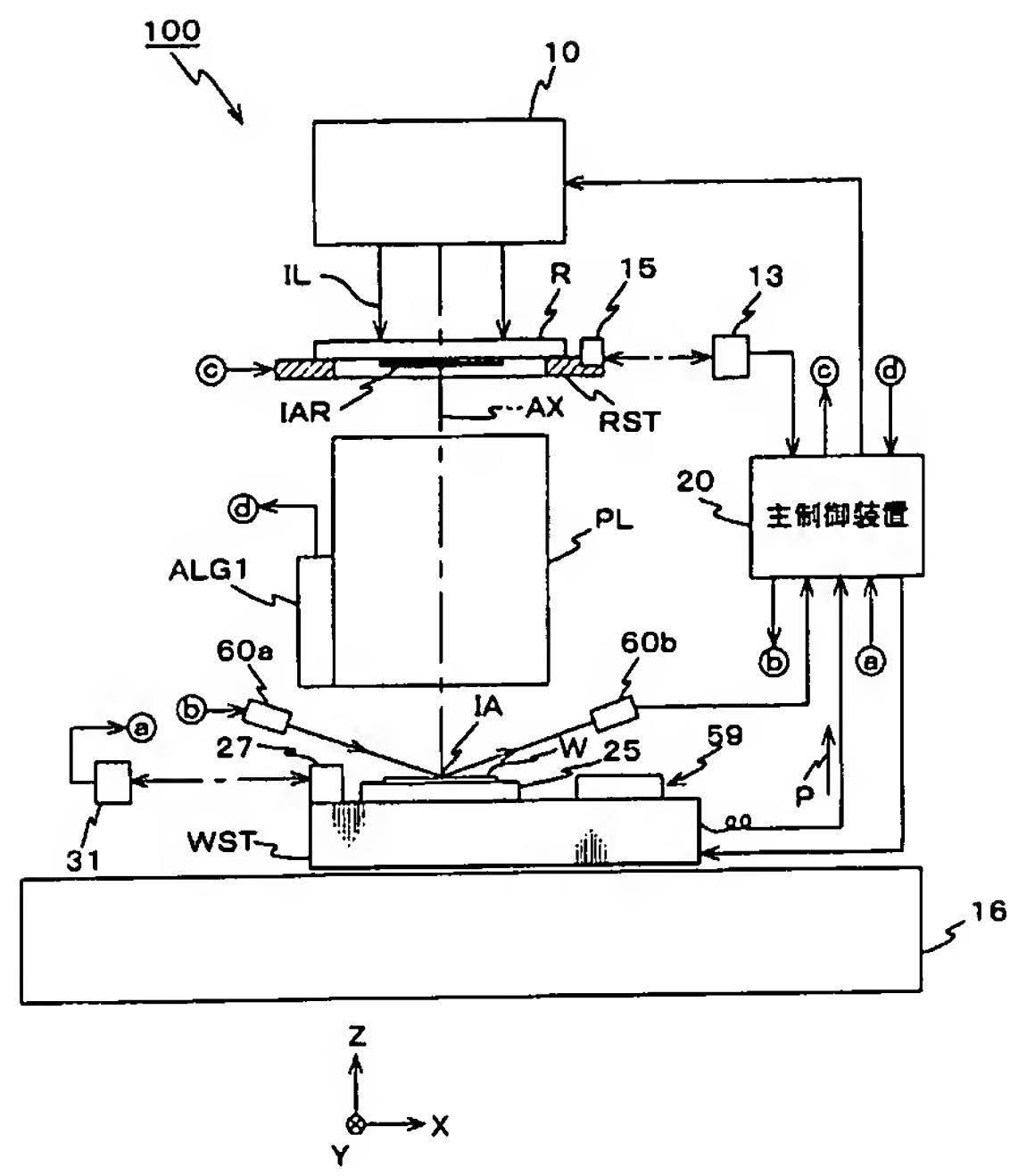
【図7】



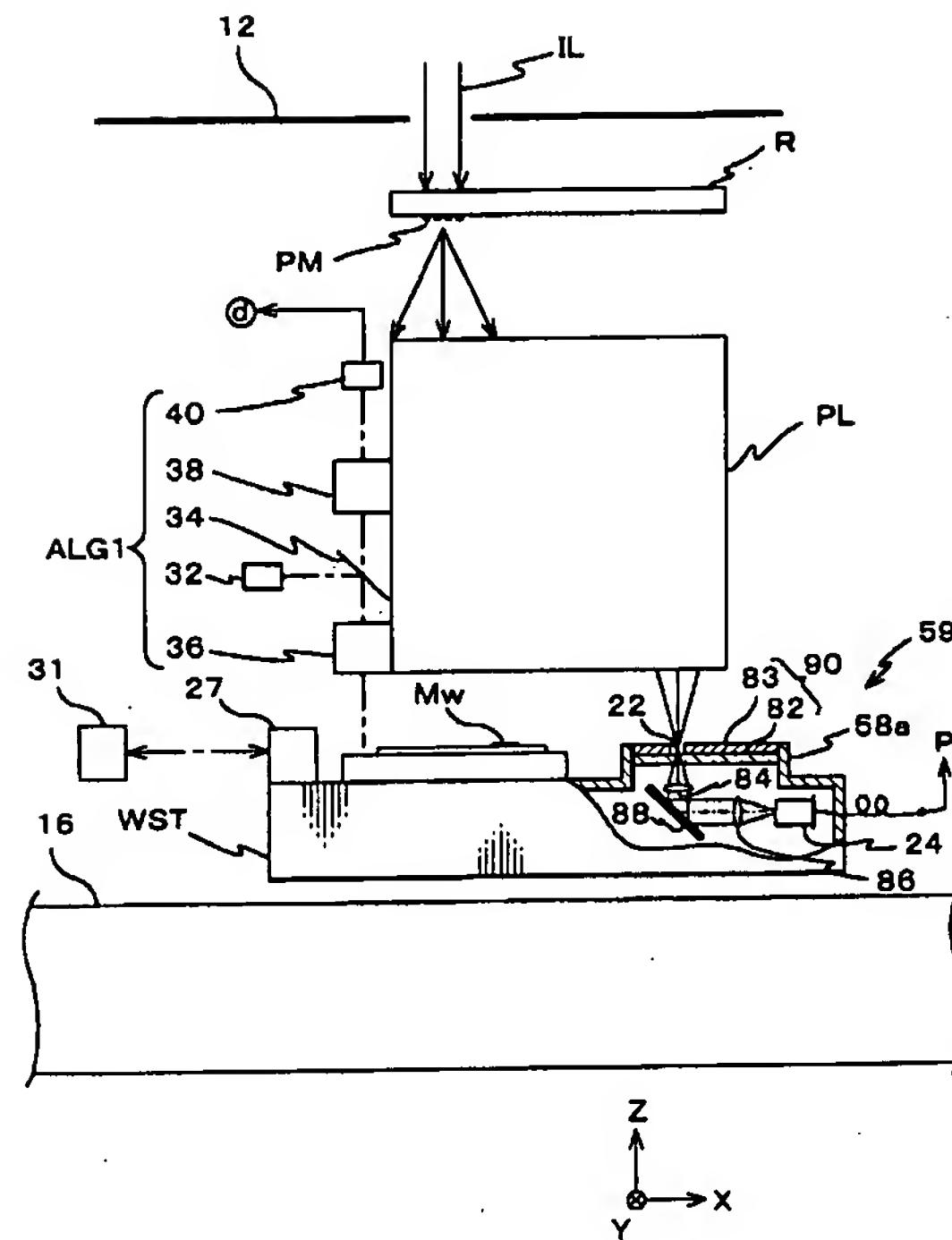
【図8】



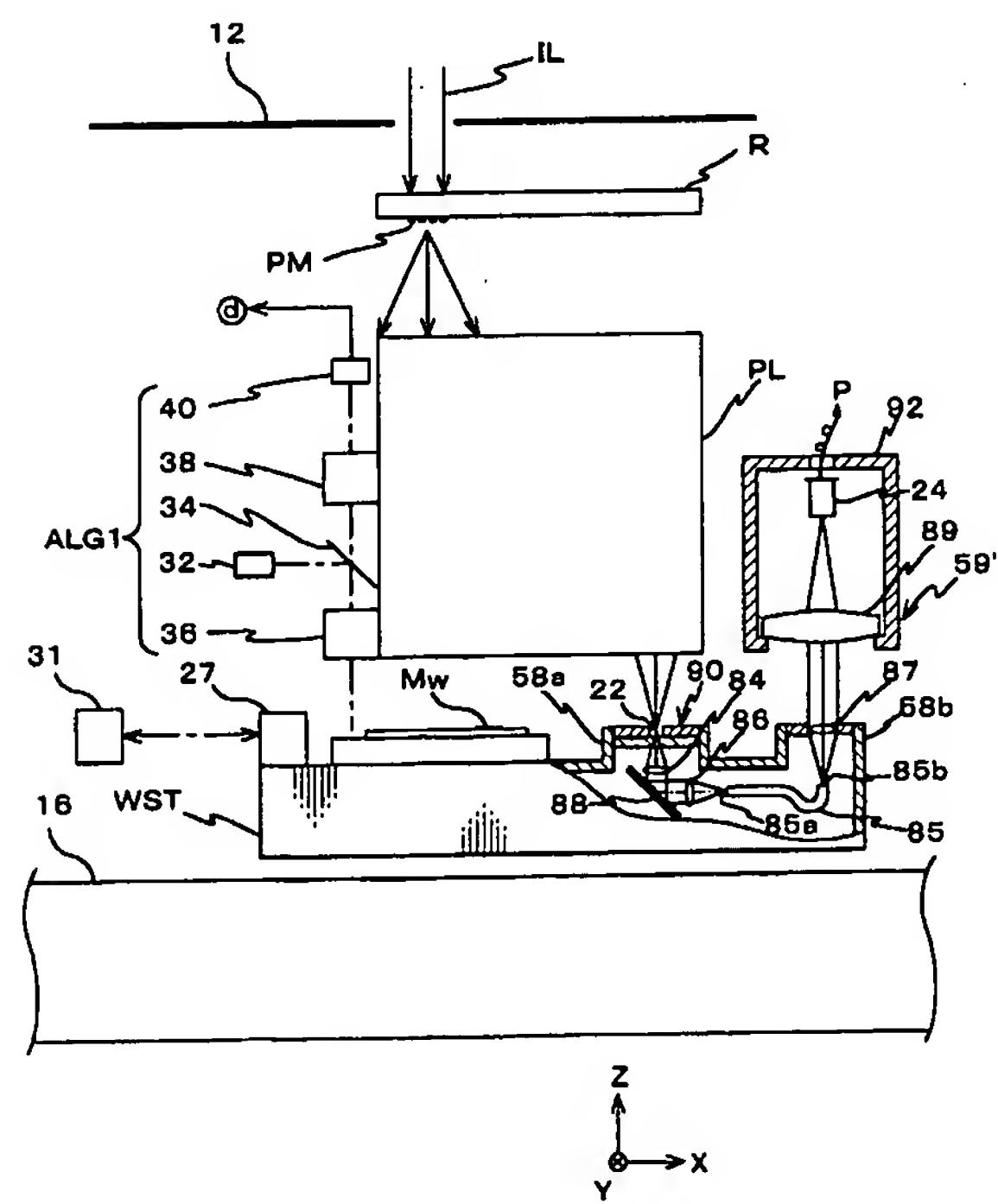
【図1】



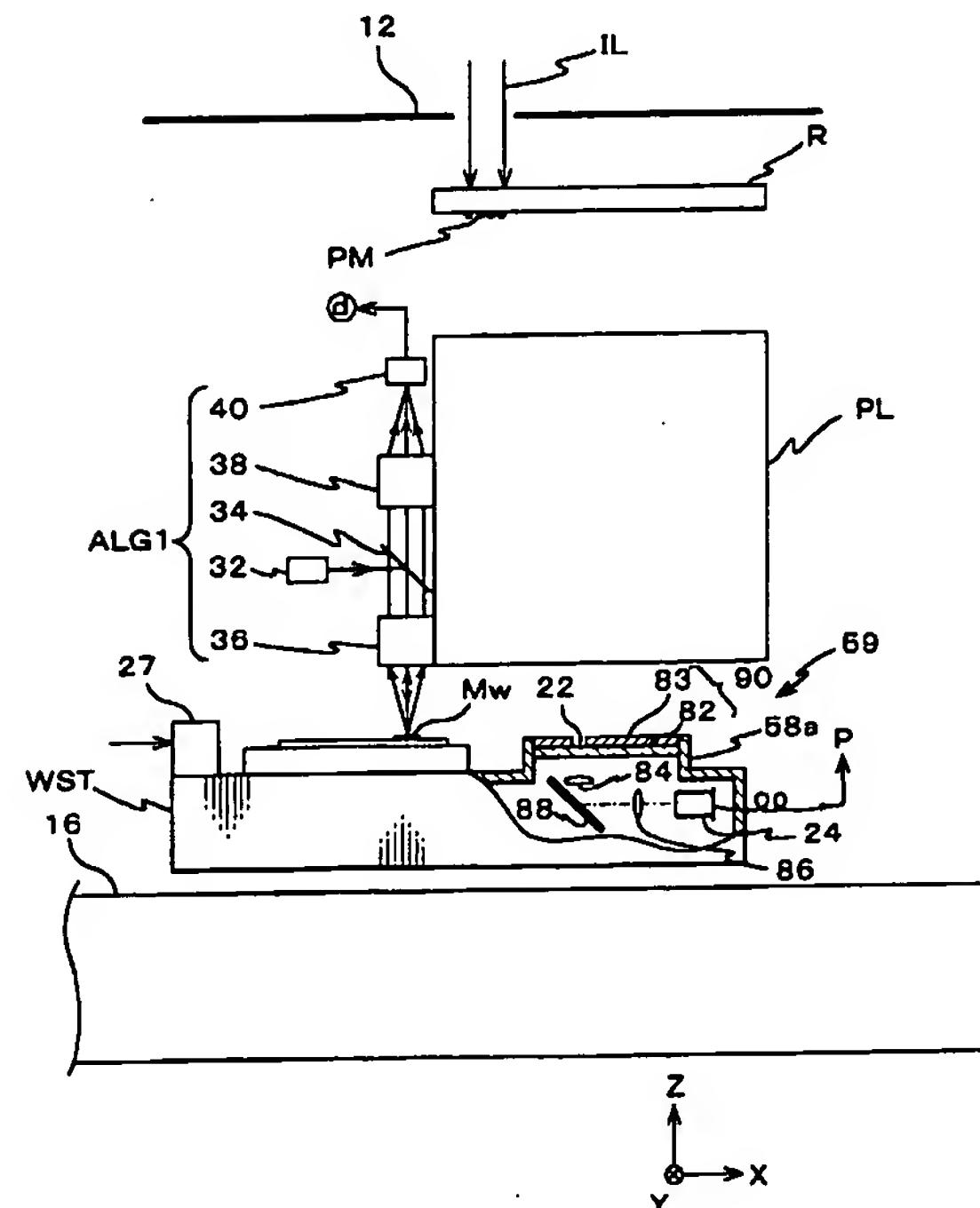
【図2】



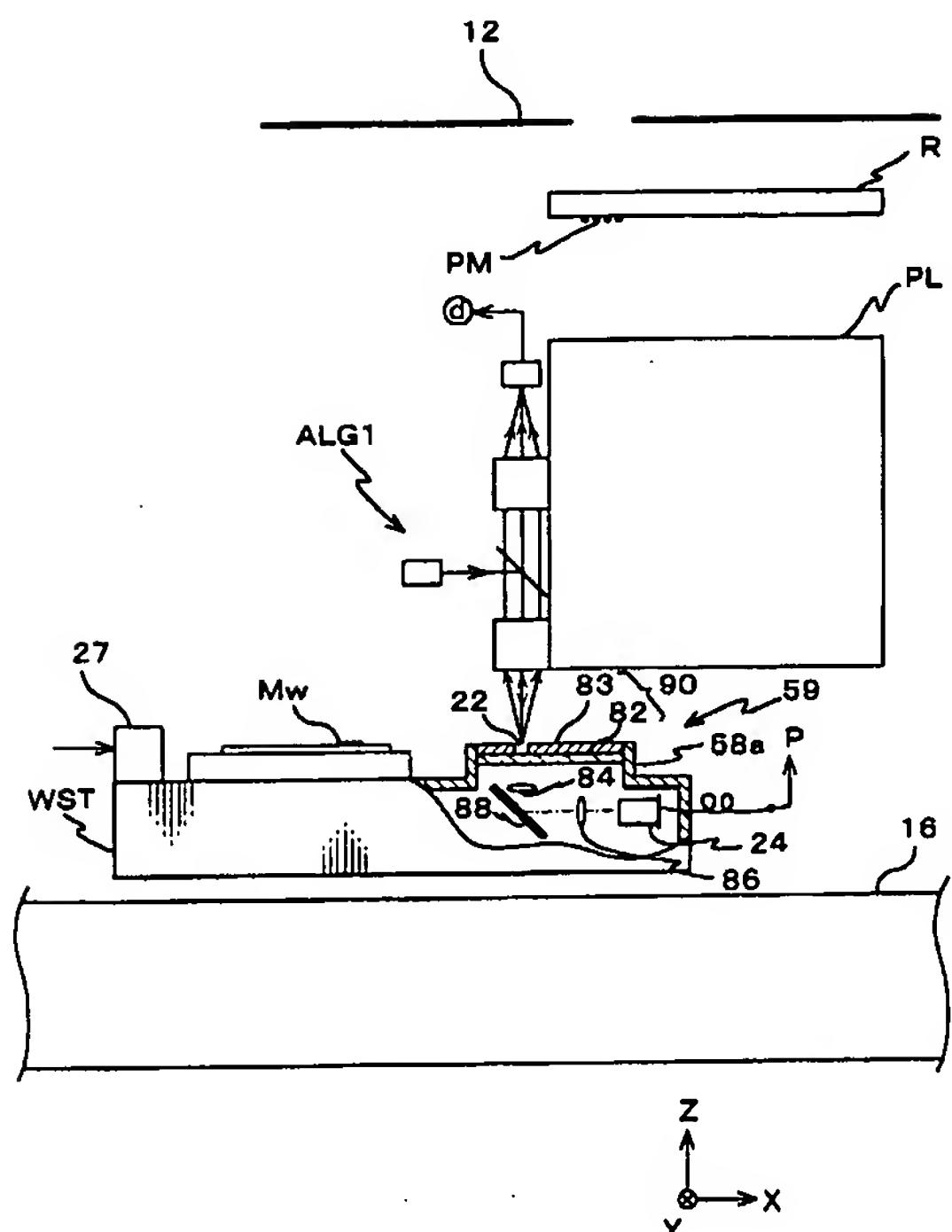
【図3】



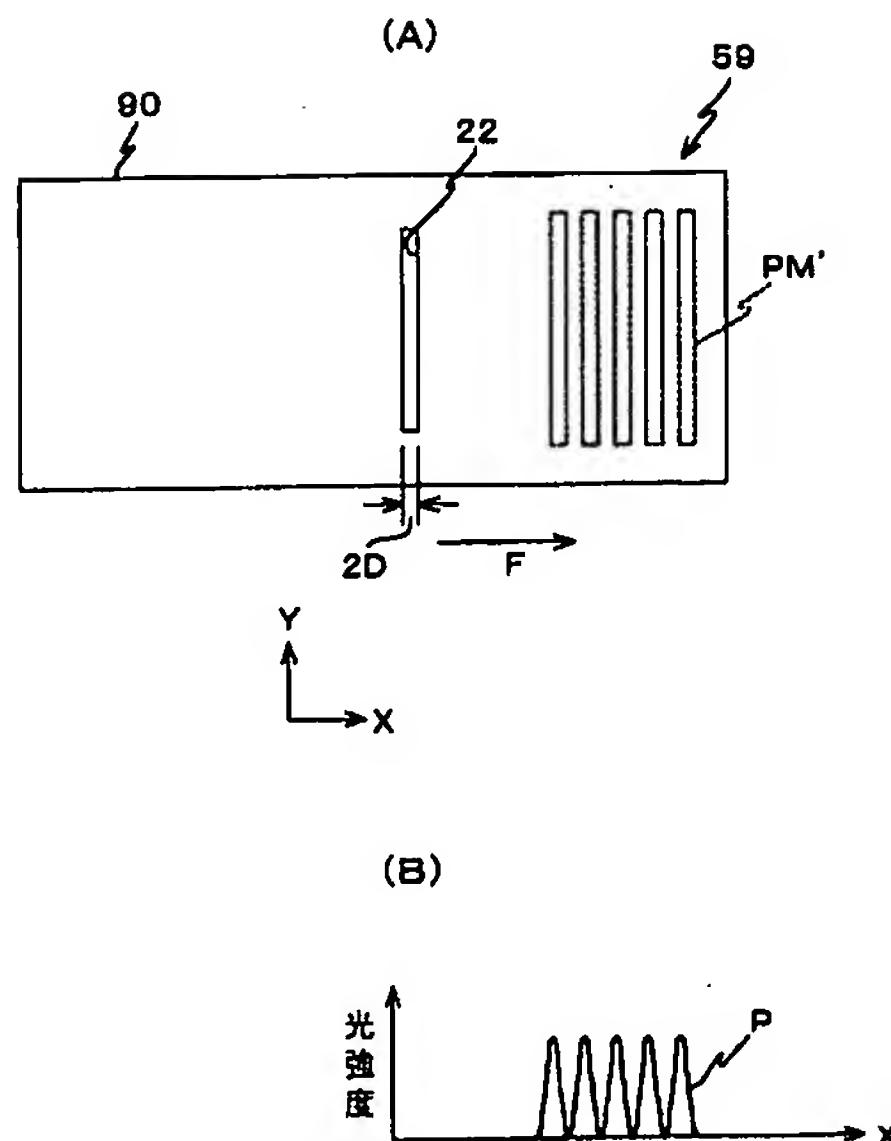
【図4】



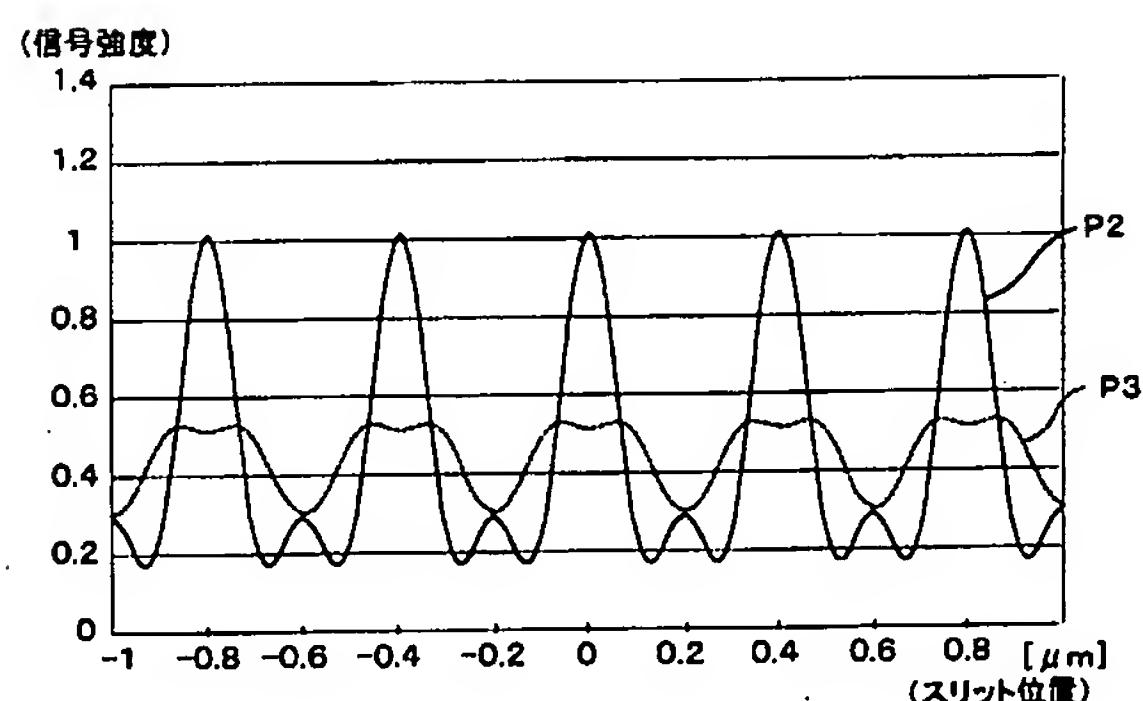
【図5】



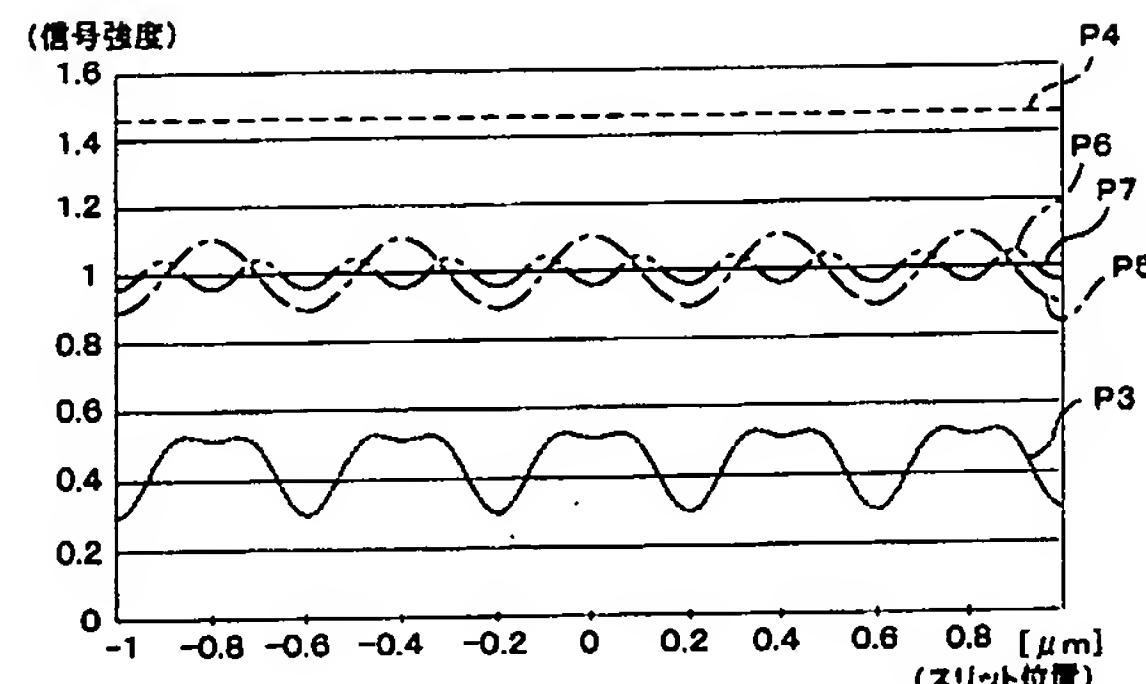
【図6】



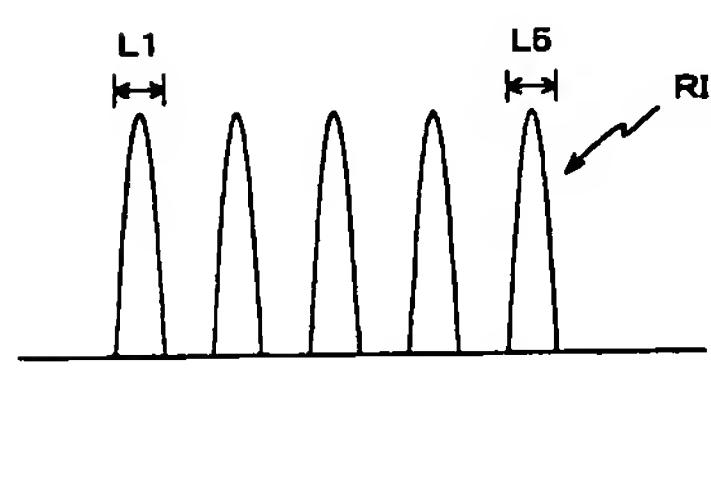
【図9】



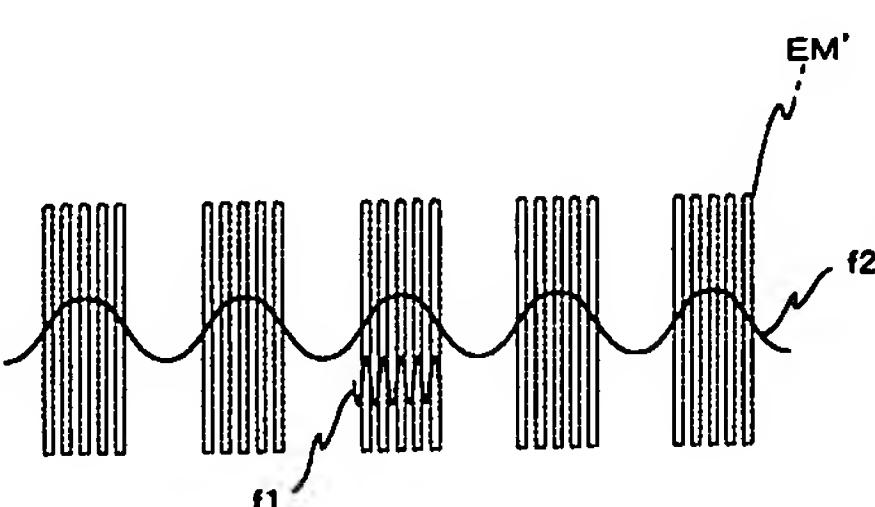
【図10】



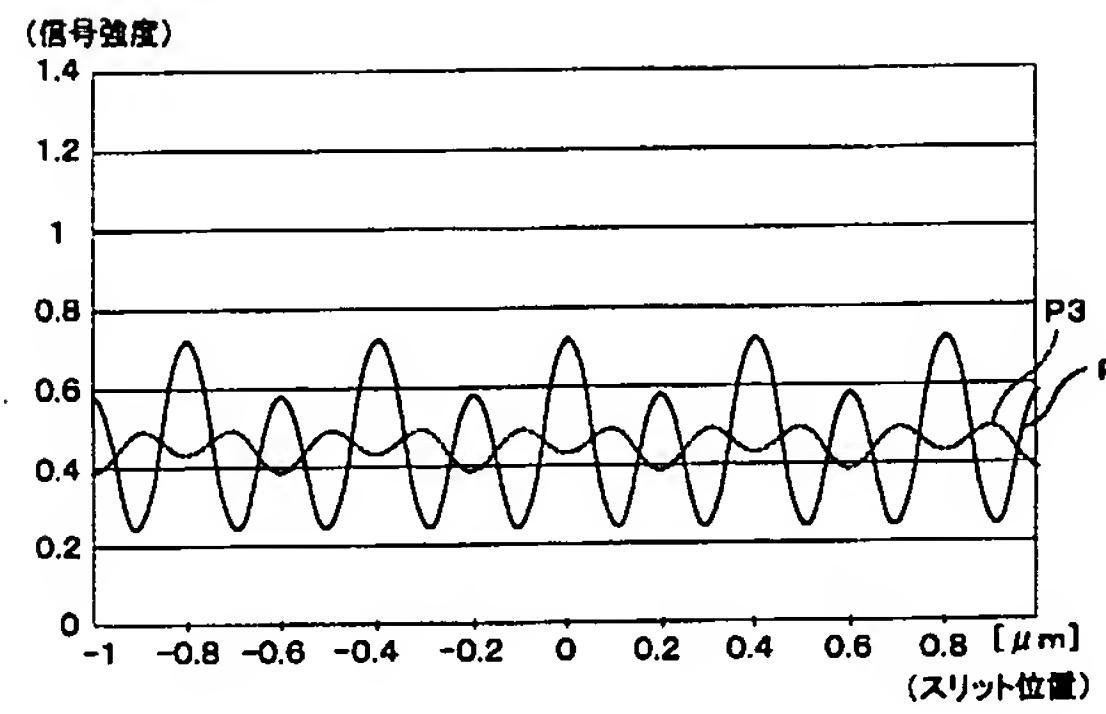
【図19】



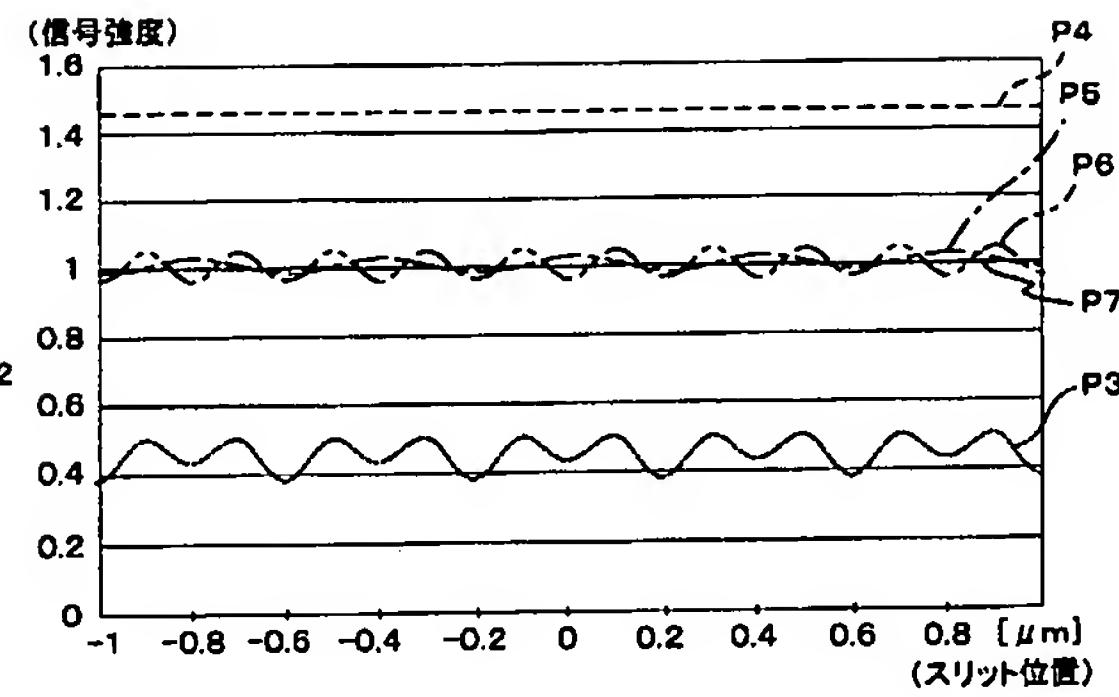
【図22】



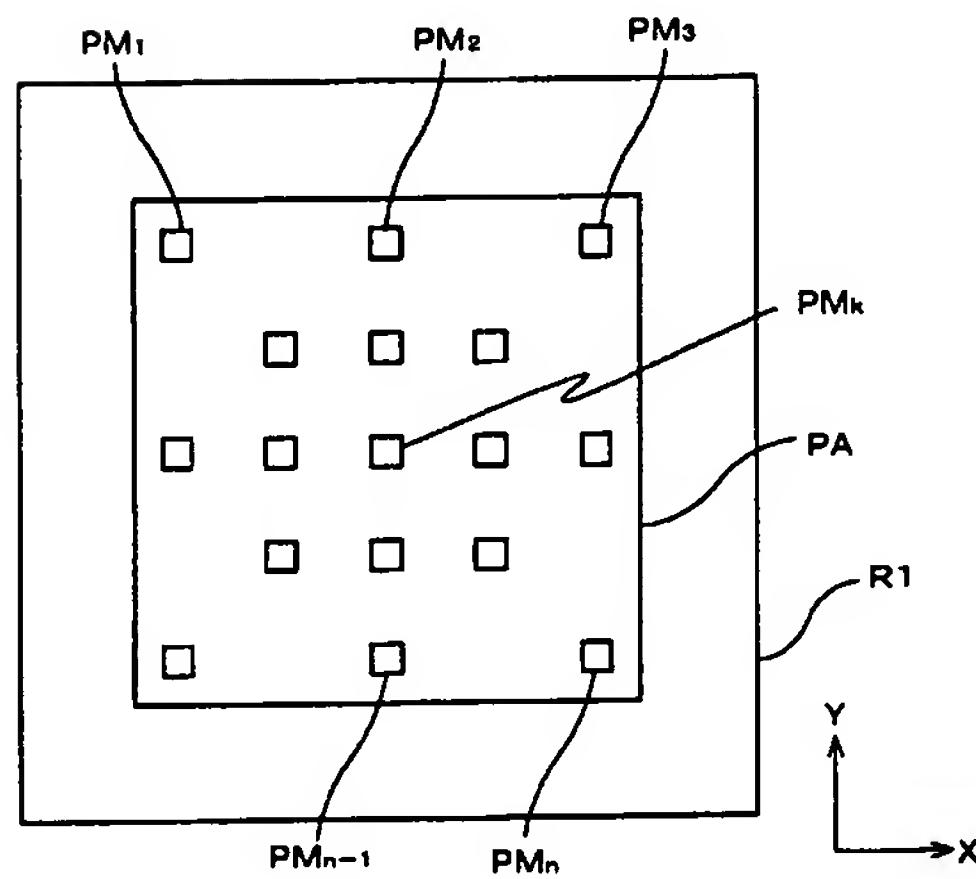
【図11】



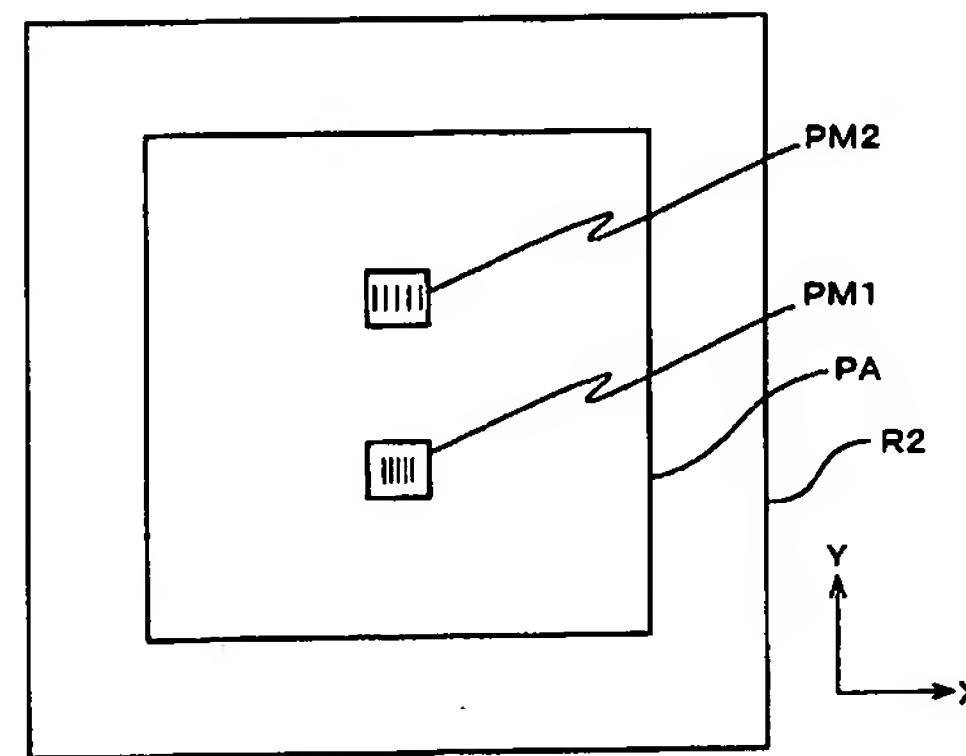
【図12】



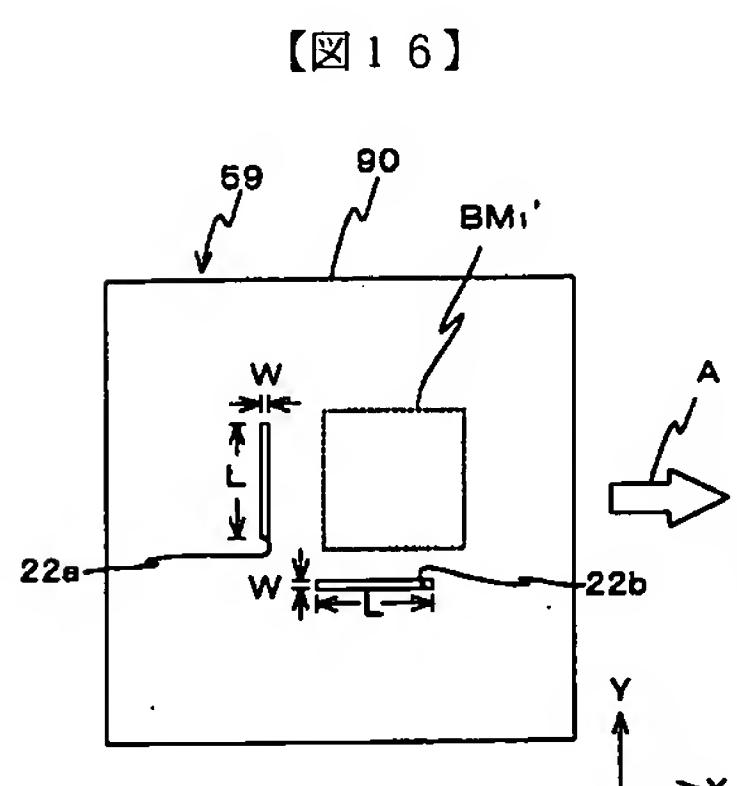
【図13】



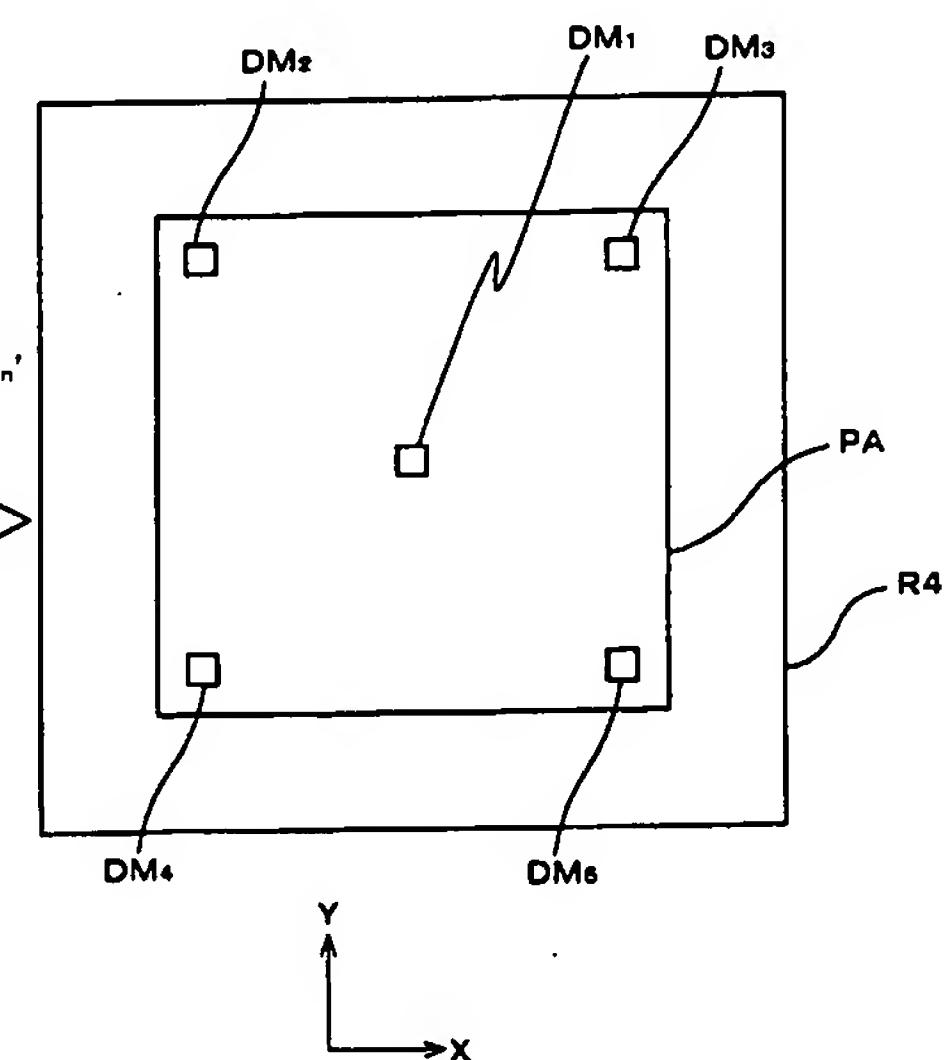
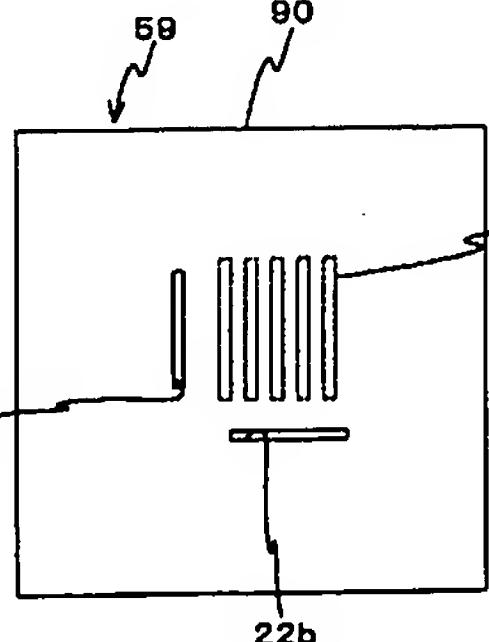
【図14】



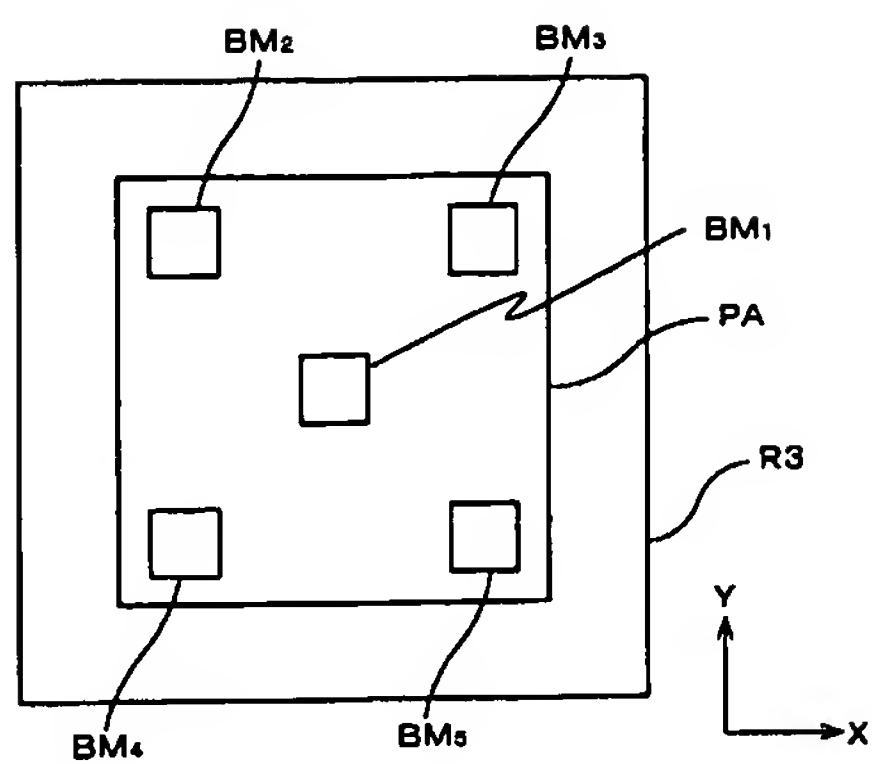
【図20】



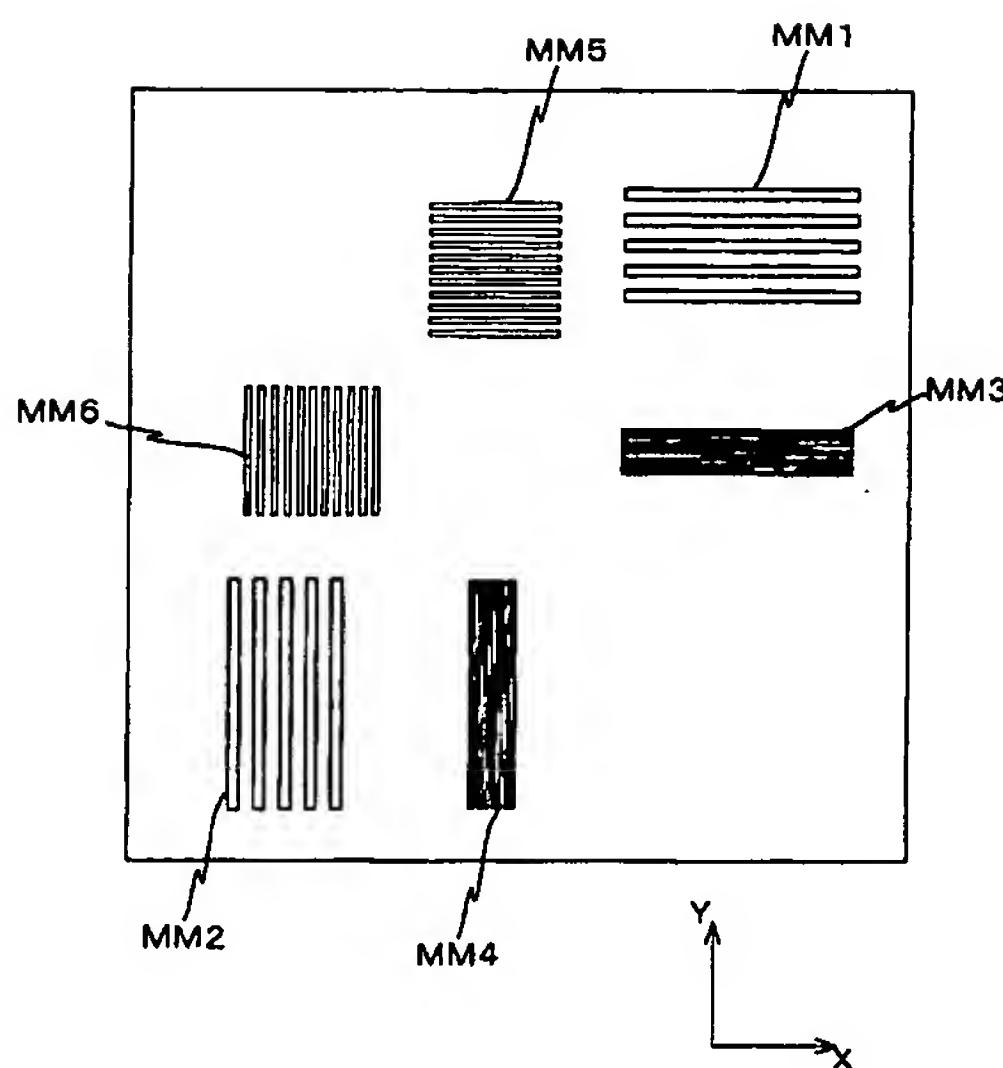
【図17】



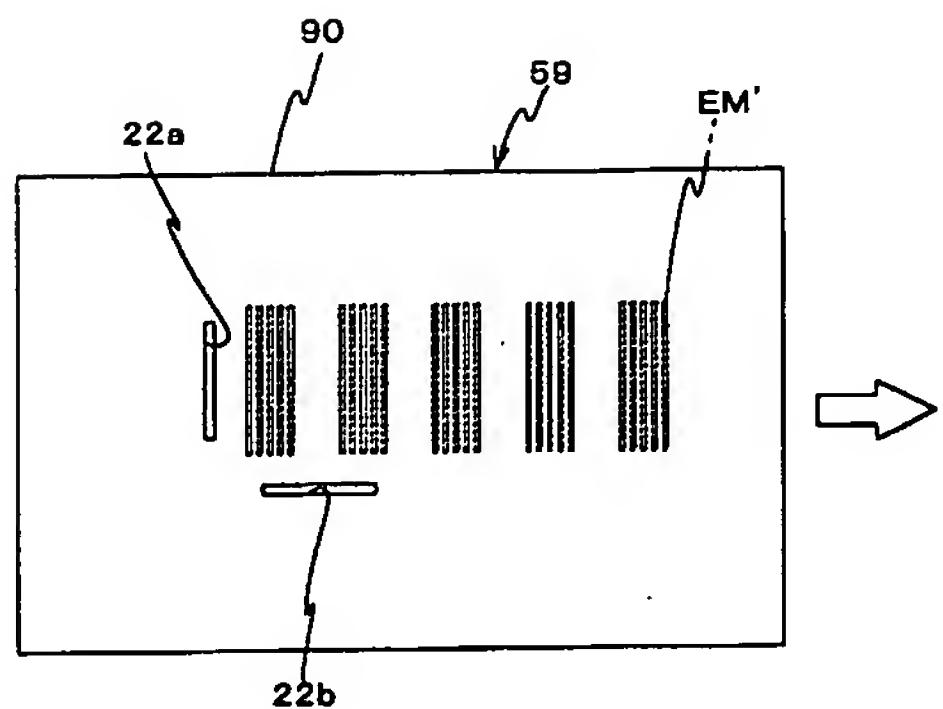
【図15】



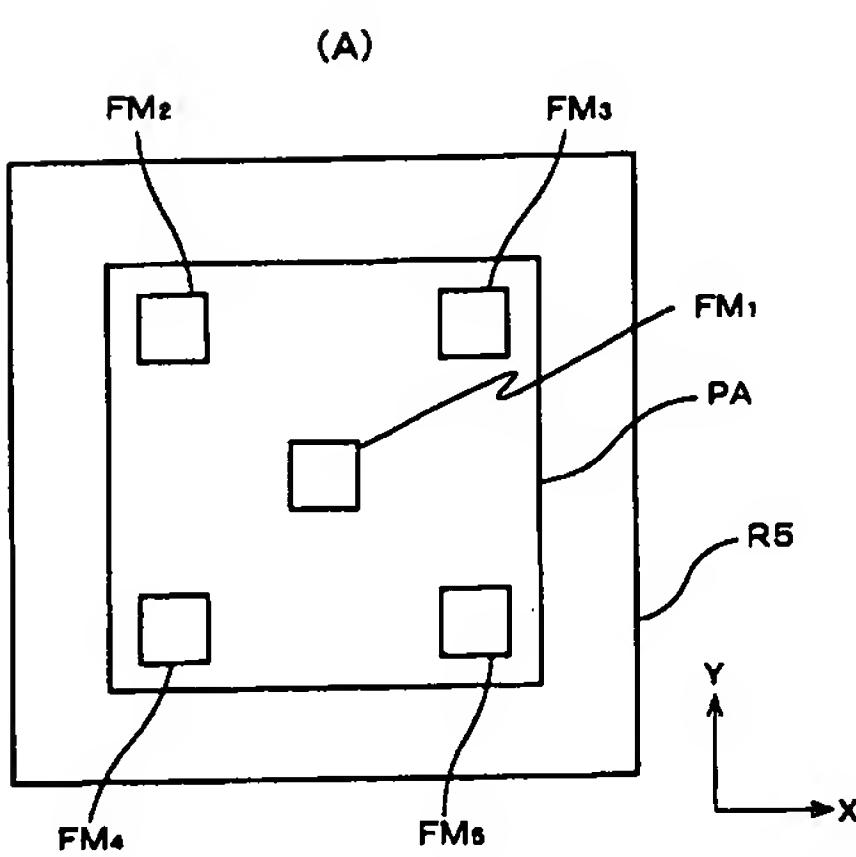
【図18】



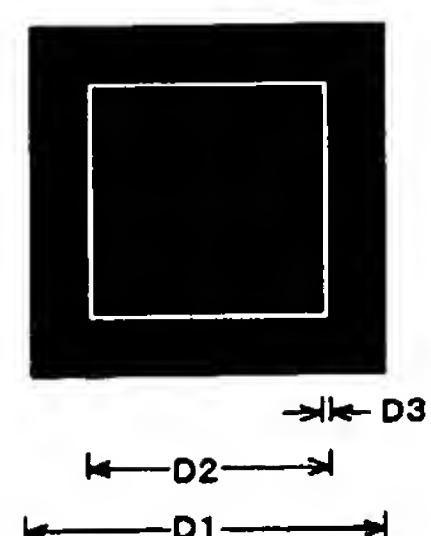
【図21】



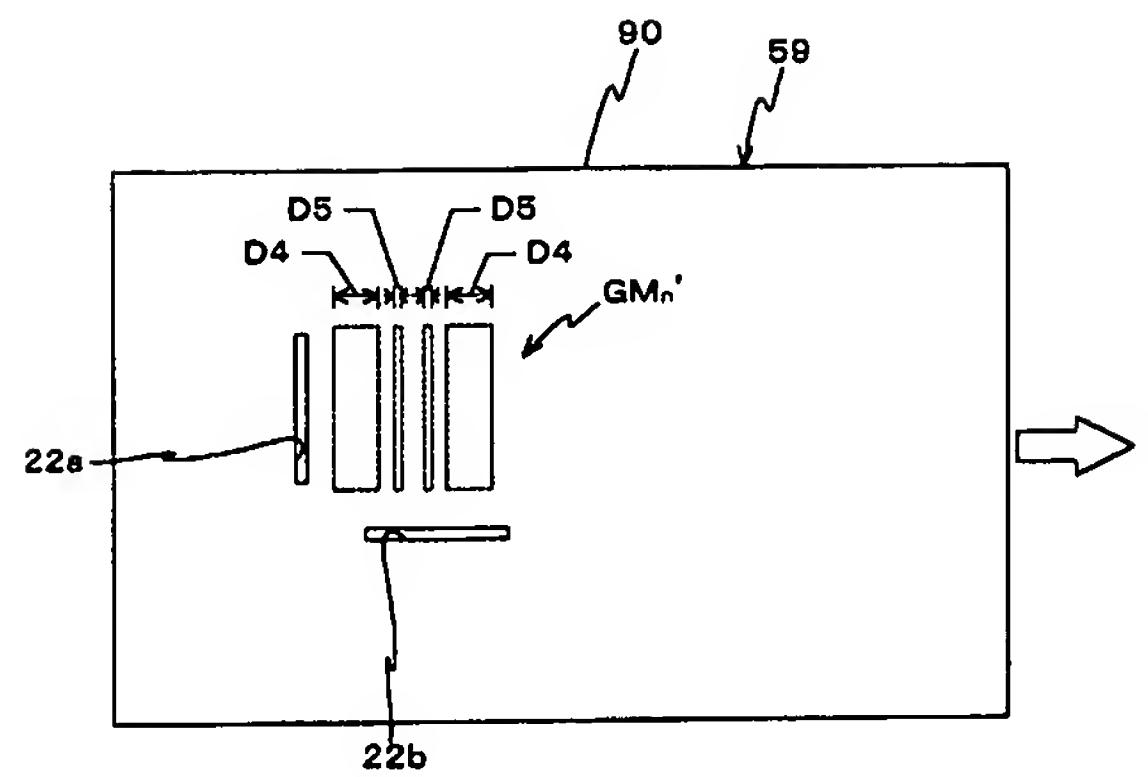
【図23】



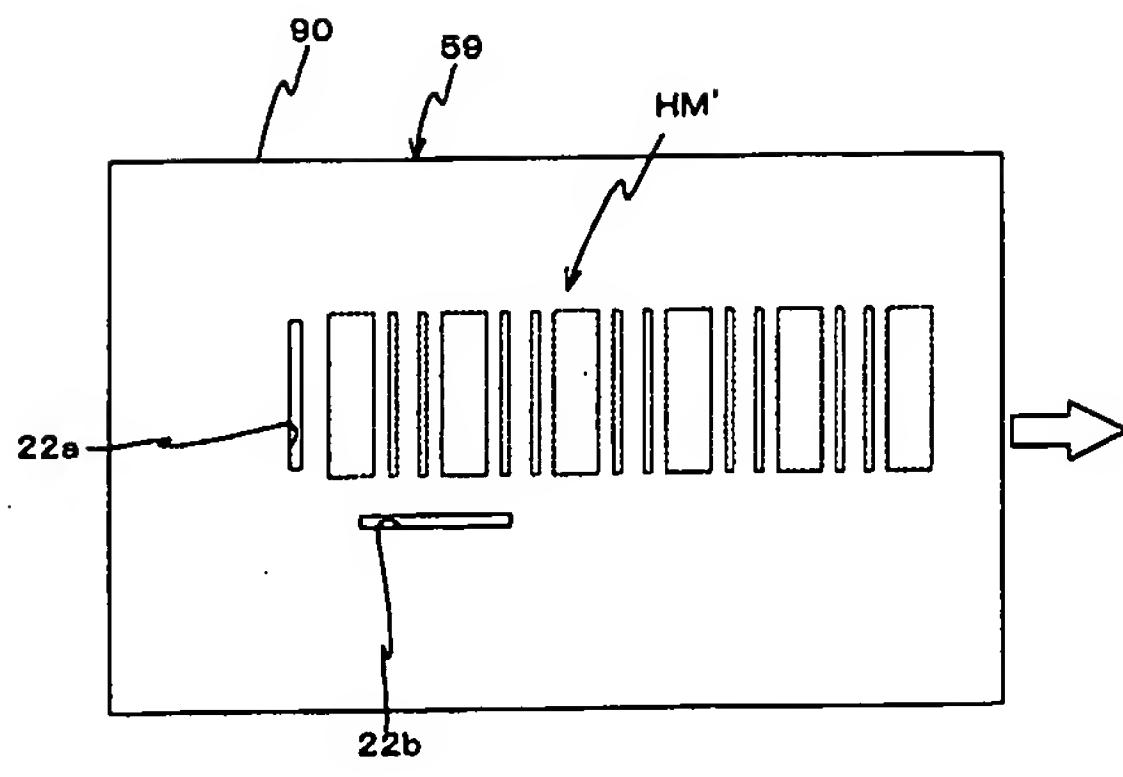
(B)



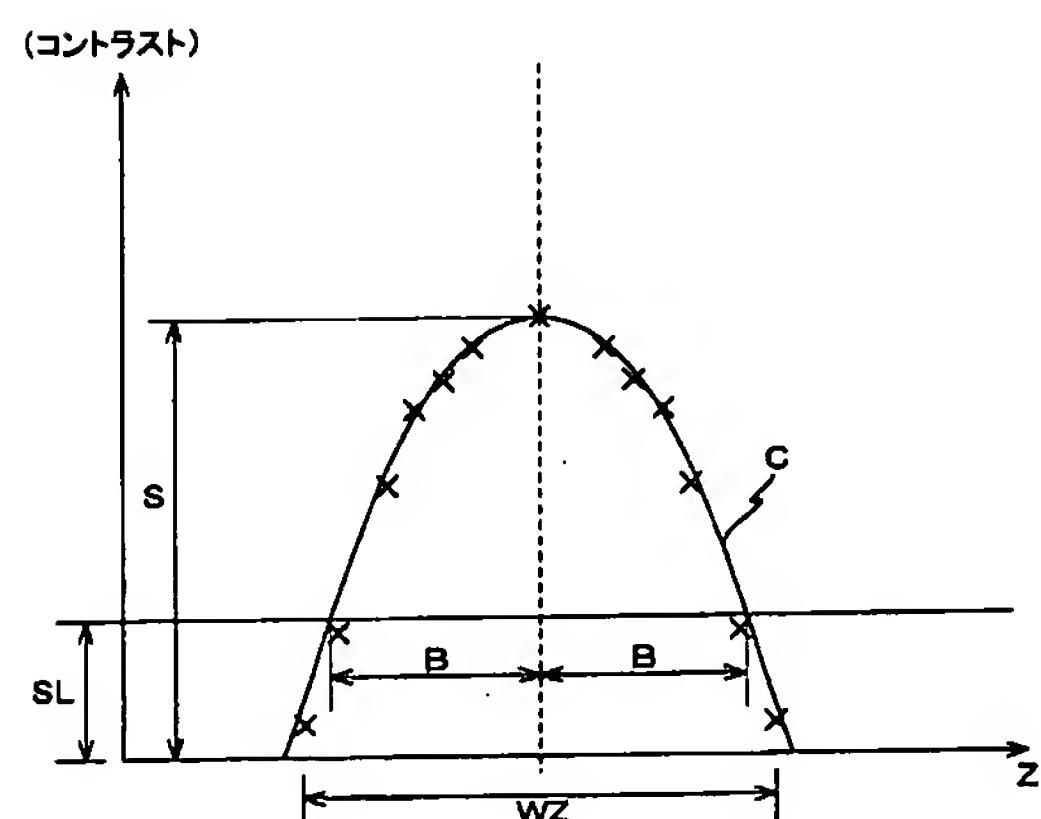
【図24】



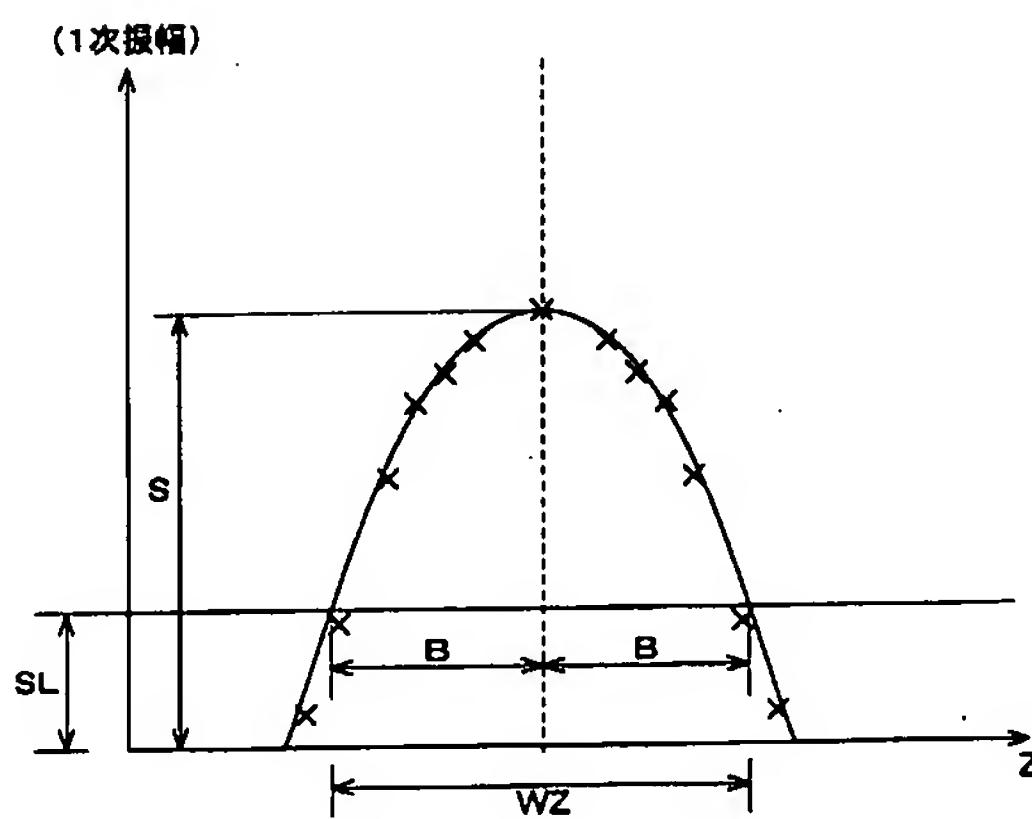
【図25】



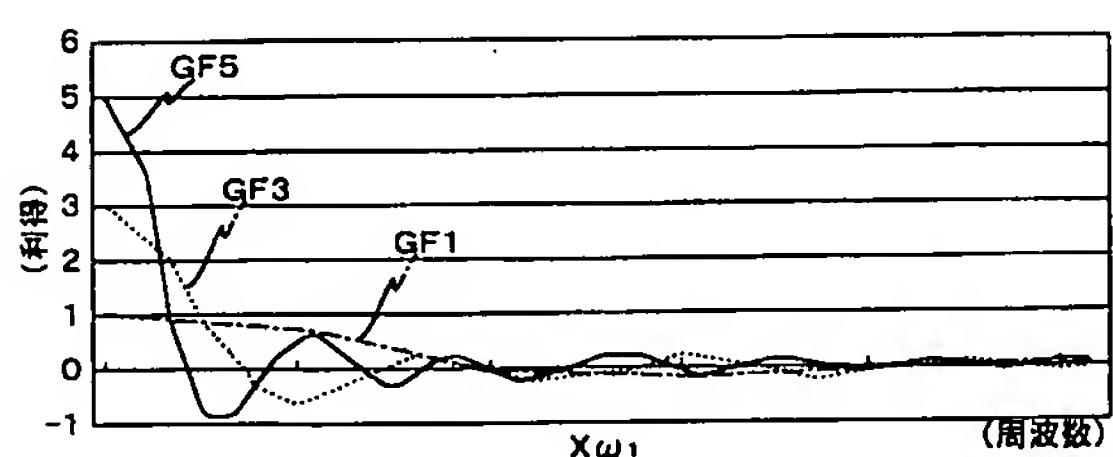
【図26】



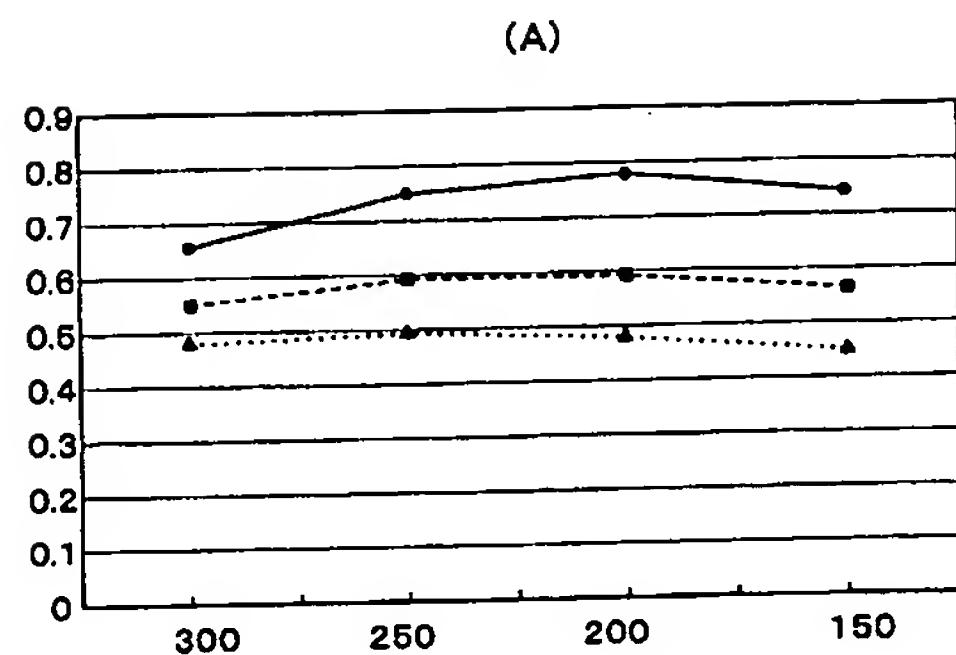
【図27】



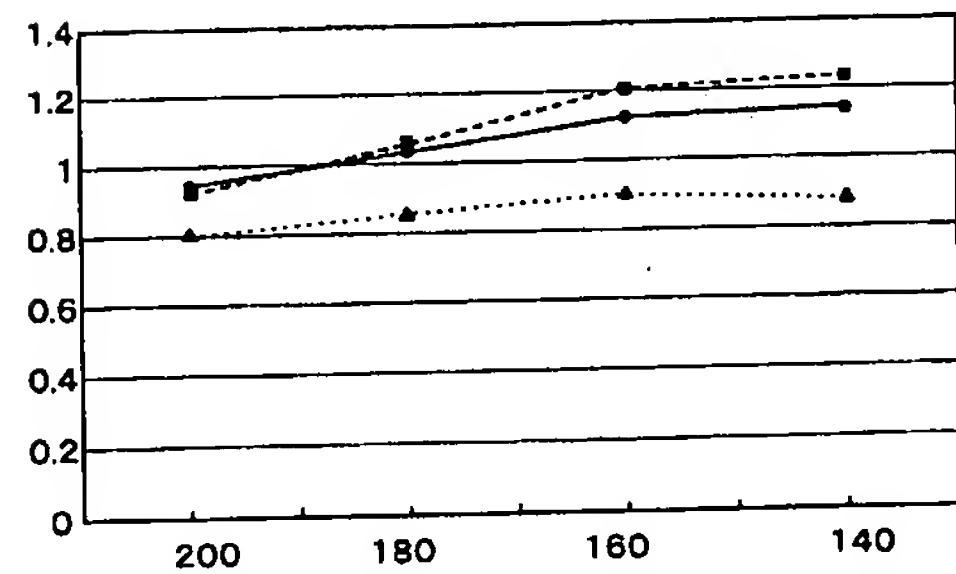
【図34】



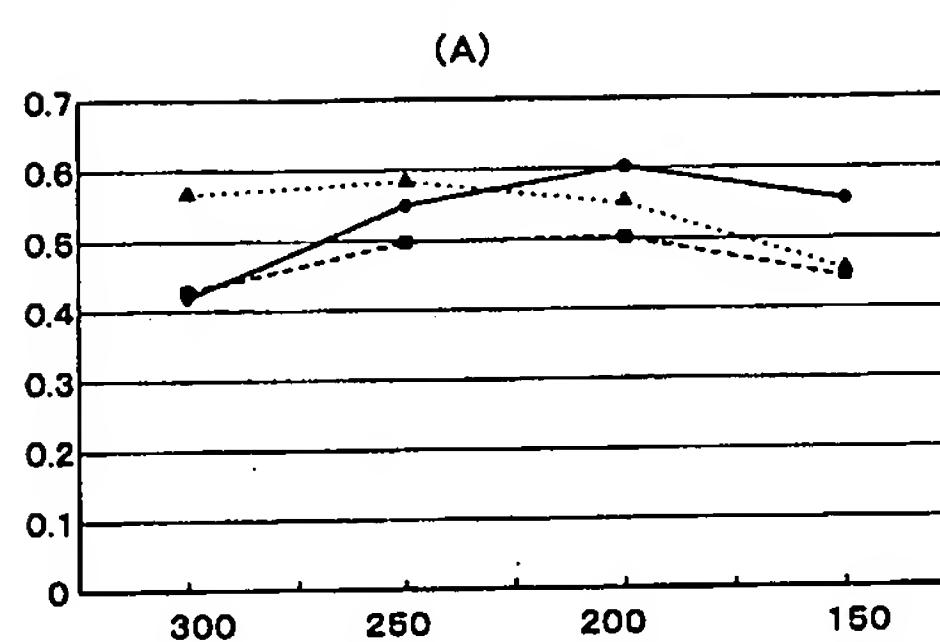
【図28】



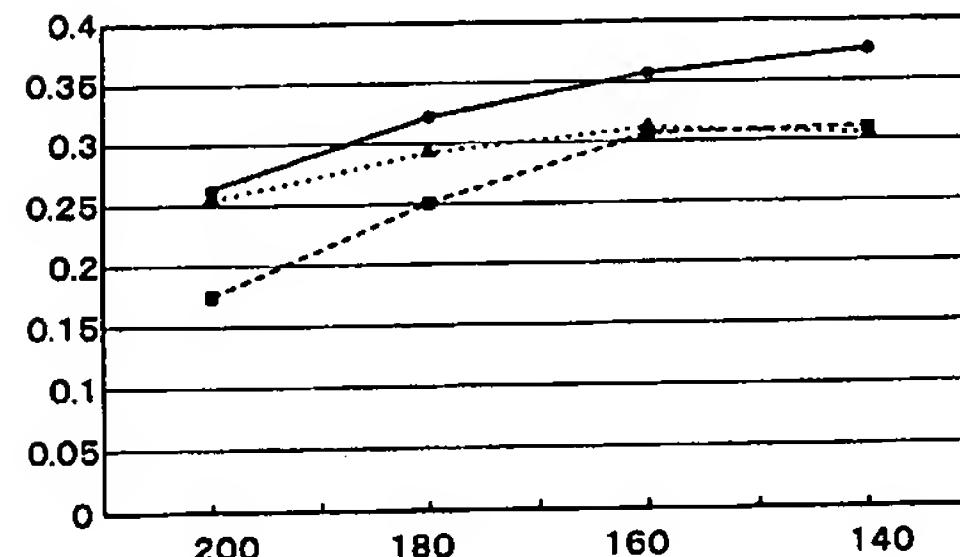
(B)



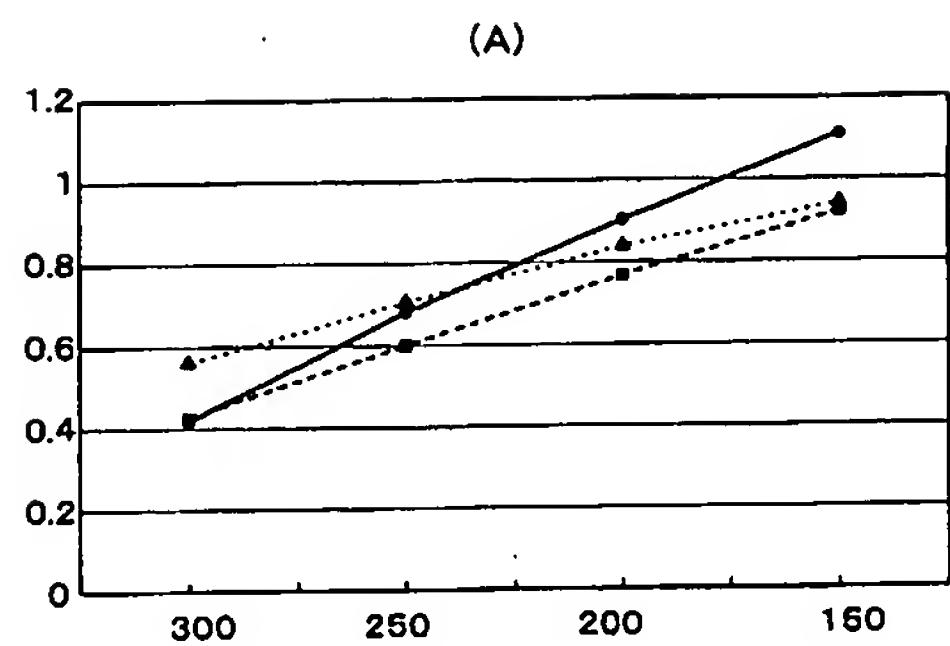
【図29】



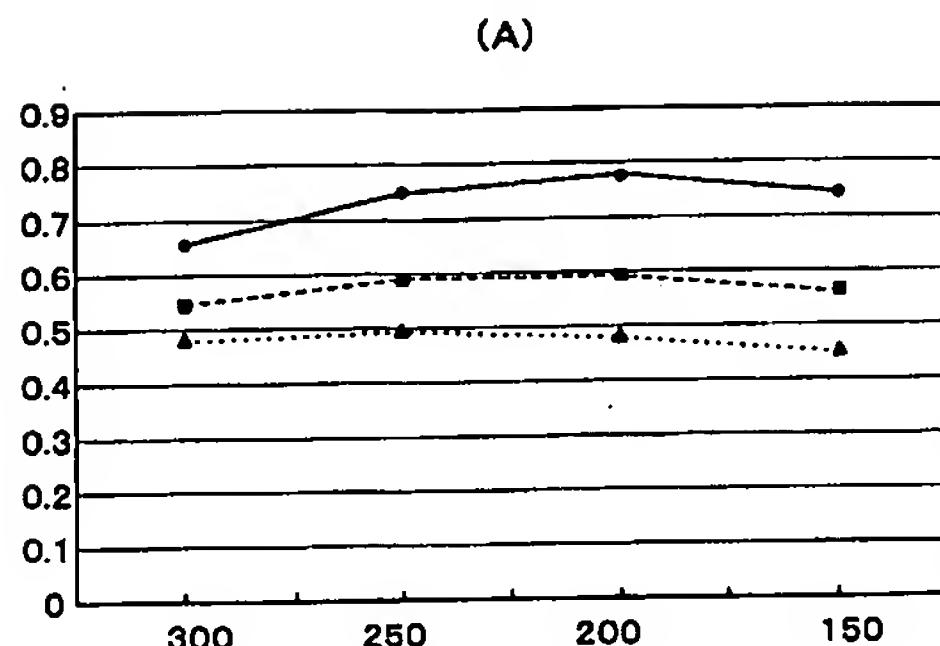
(B)



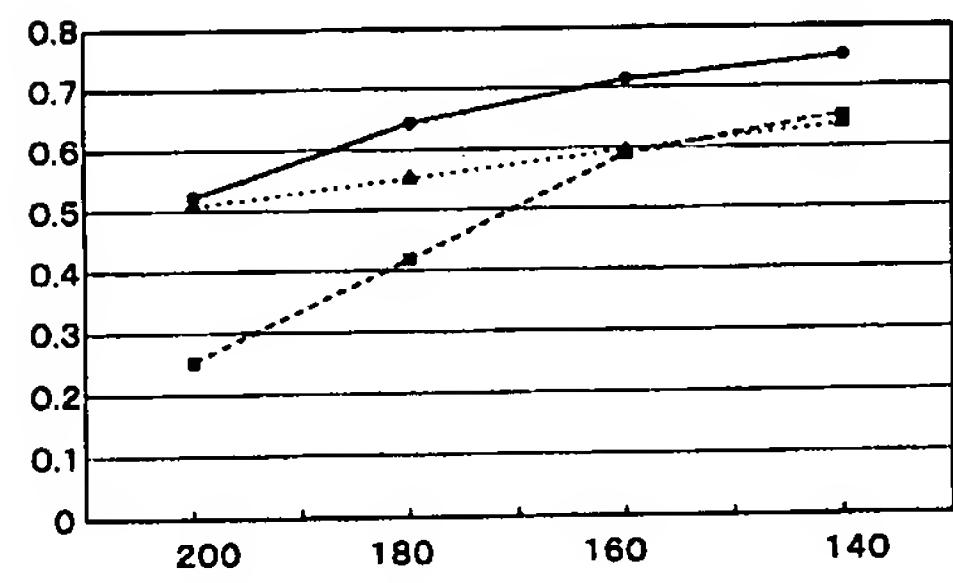
【図30】



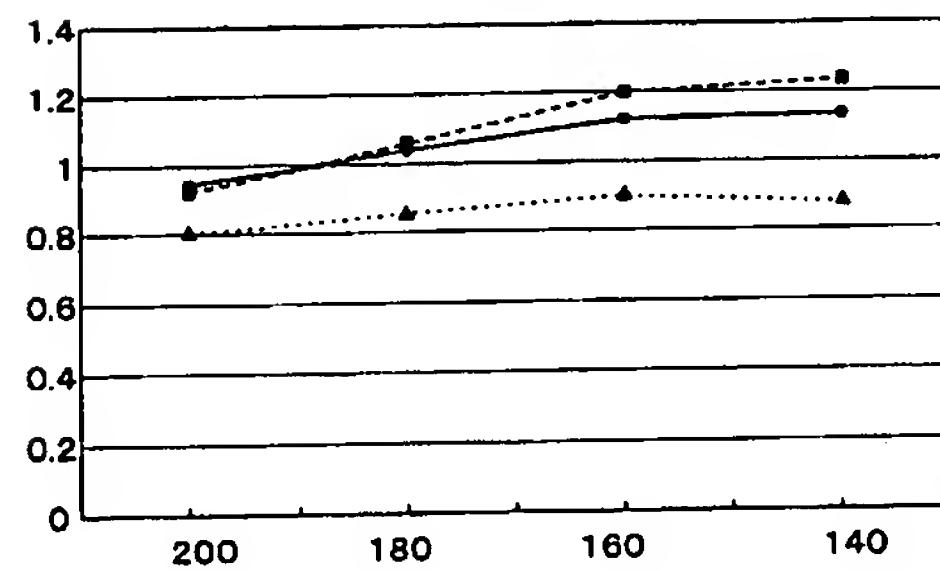
【図31】



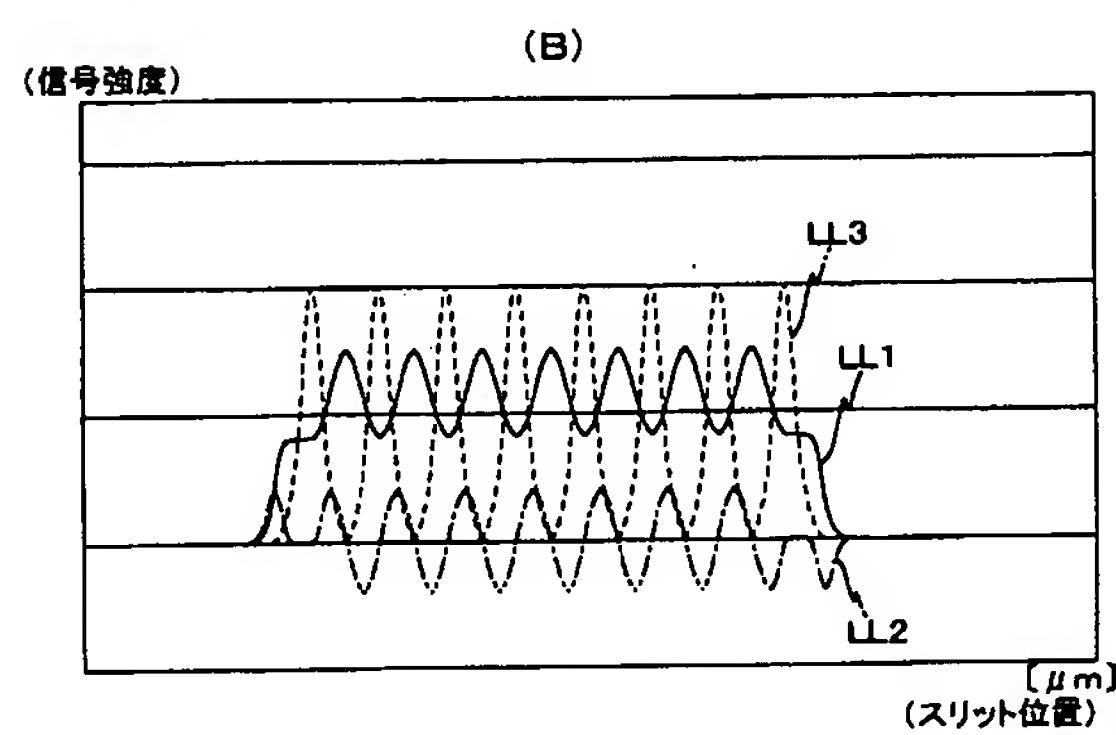
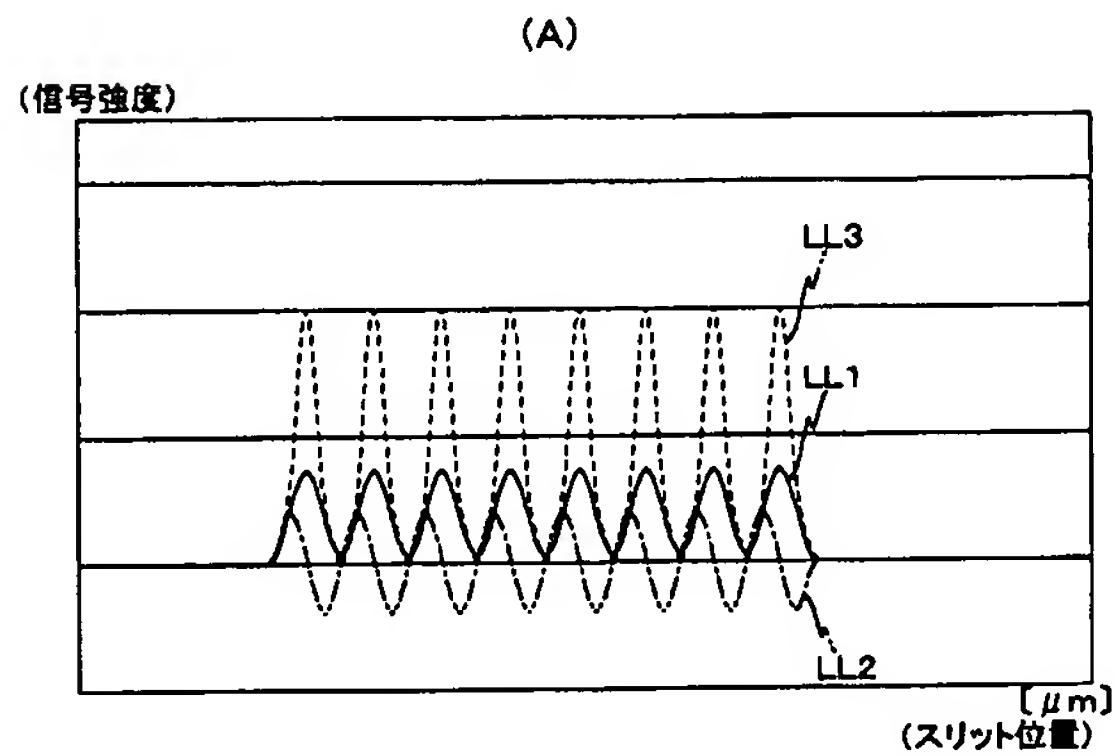
(B)



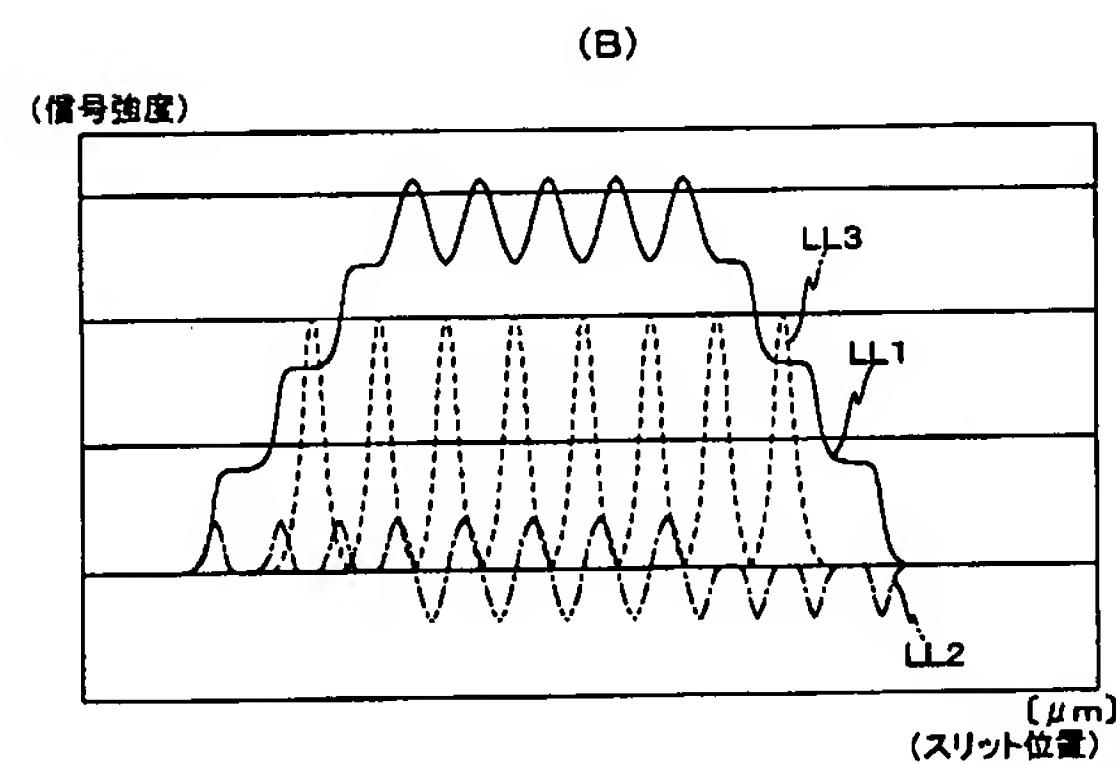
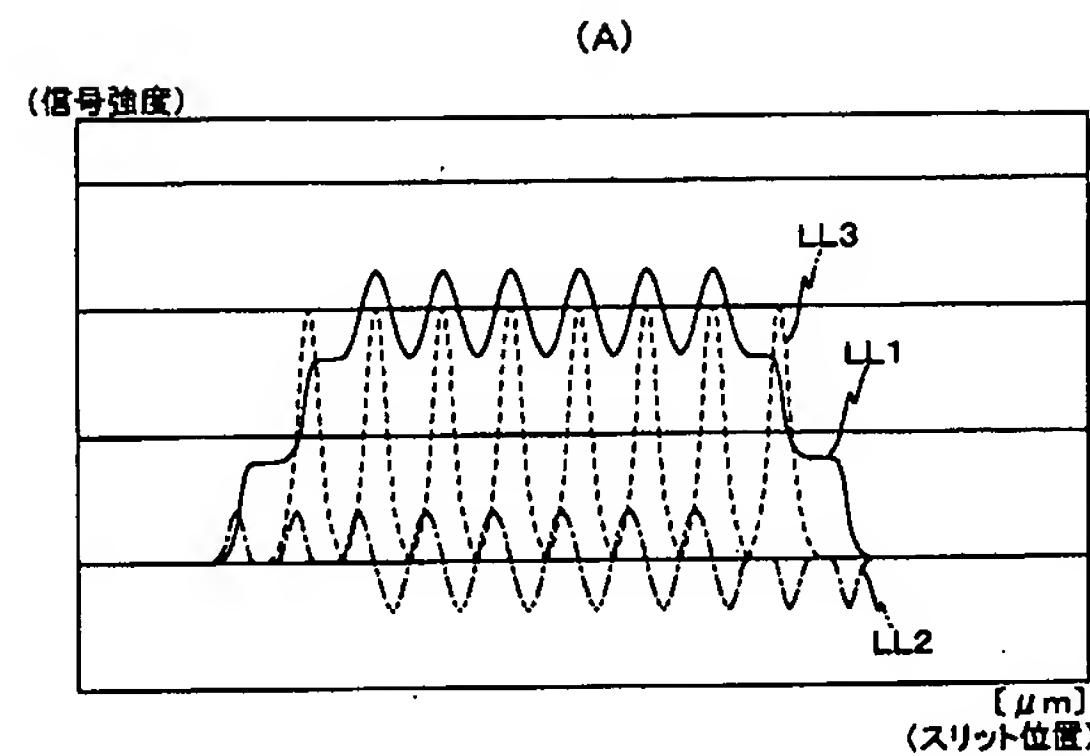
(B)



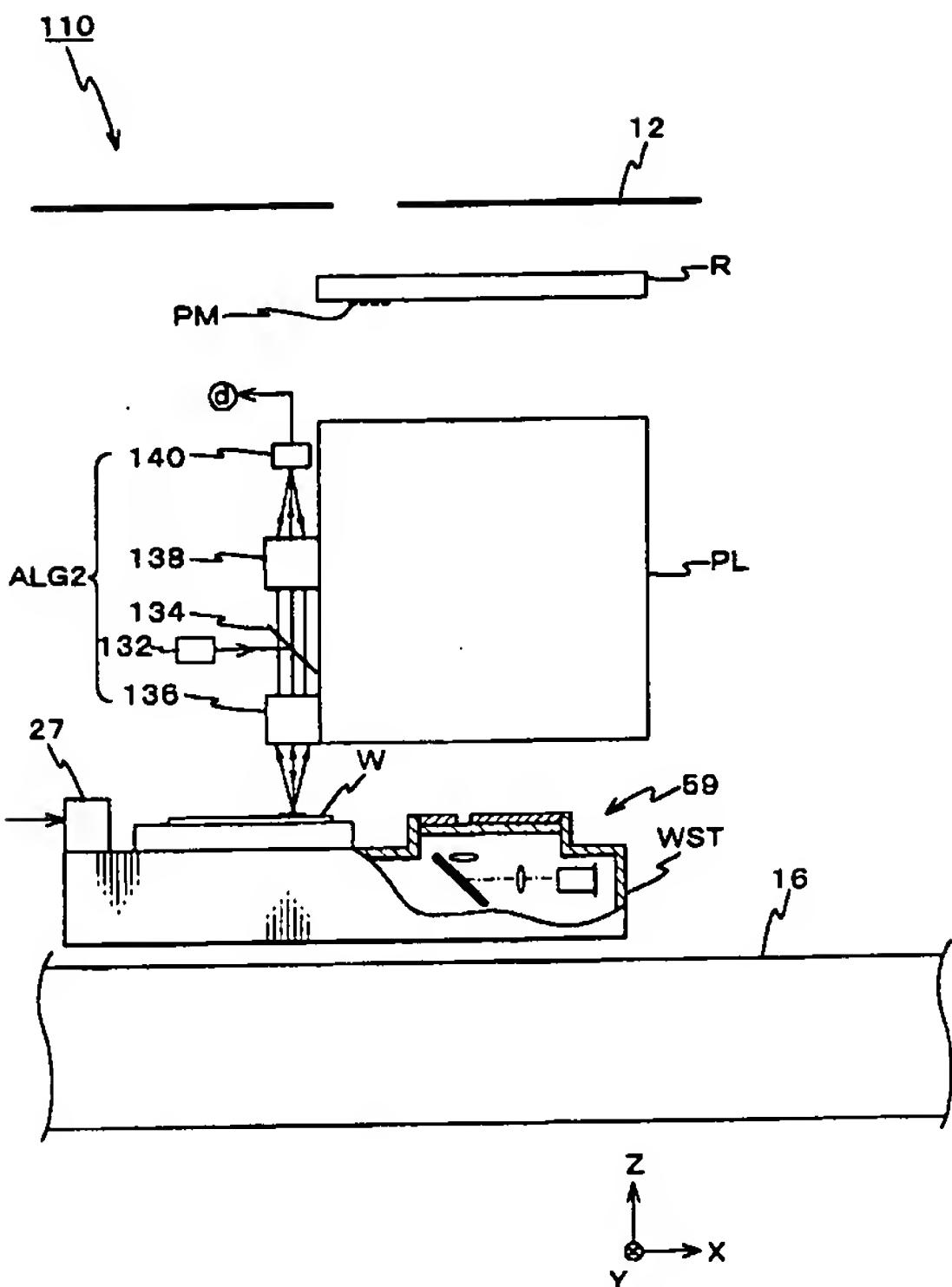
【図32】



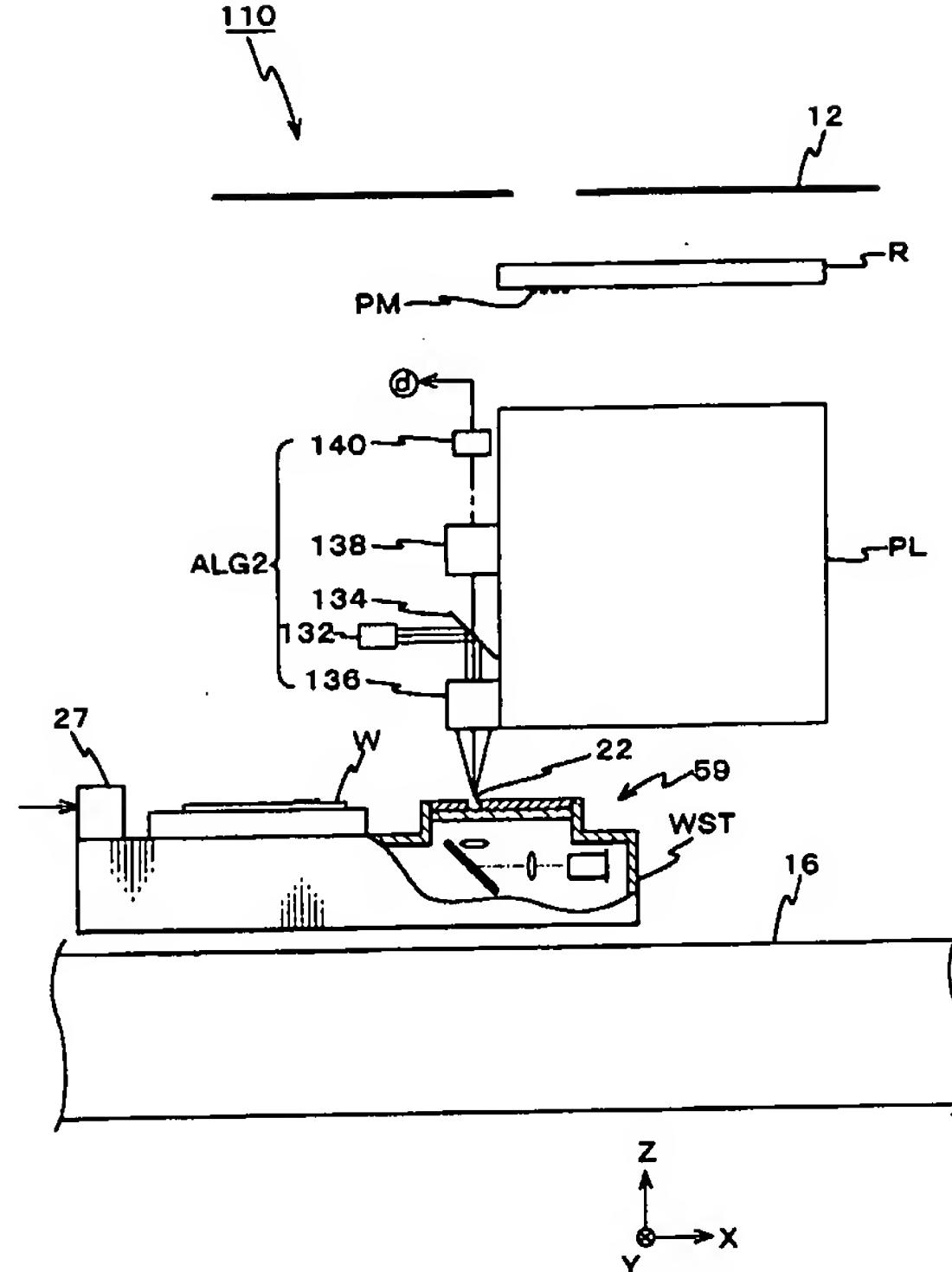
【図33】



【図35】

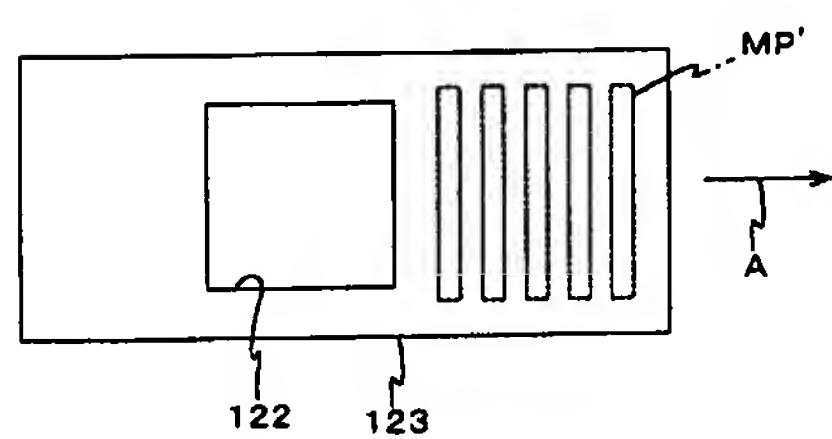


【図36】

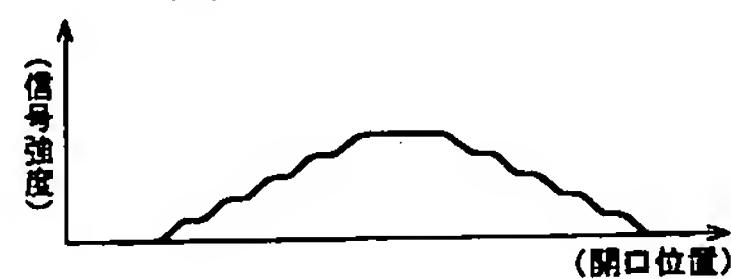


【図38】

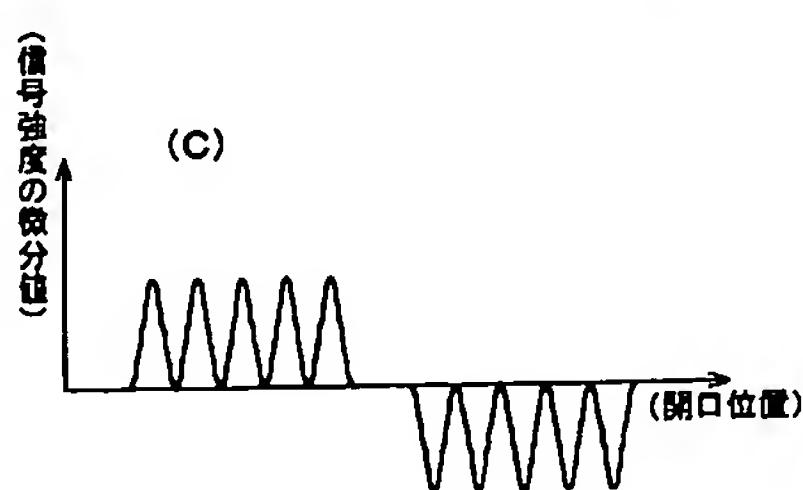
(A)



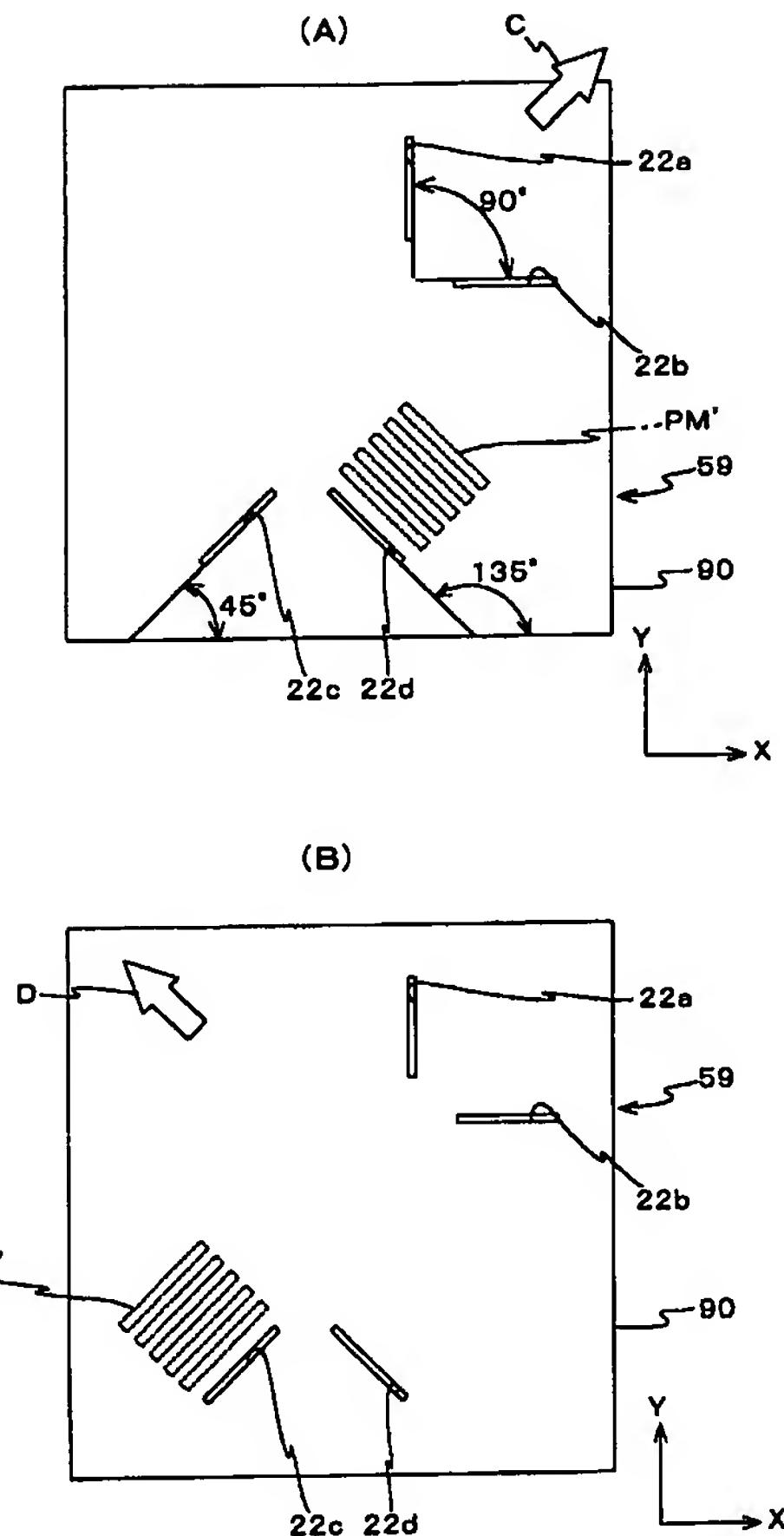
(B)



(C)



【图37】



## フロントページの続き

(51) Int.C1.<sup>7</sup>

G 03 F 7/22

H O 1 L 21/027

## 識別記号

F I

G O 3 F 7/22

H O I L 21/30

### テーマコード (参考)

H

525R

F ターム(参考) 2F065 AA04 AA06 AA07 CC20 DD04  
EE08 FF01 GG04 HH06 HH13  
LL01 LL28 LL63 MM24 PP12  
QQ16 QQ23 QQ41 UU01 UU02  
UU05  
2G086 HH05 HH07  
5F046 BA03 DB05 DB08 FA09 FA16  
FB14 FB16

(19) Japan Patent Office (JP)

(11) Japanese Unexamined Patent Application Publication Number

## (12) Japanese Unexamined Patent Application Publication (A)

2002-14005

(43) Publication date: January 18, 2002

| (51) Int. Cl. <sup>6</sup> | Identification Symbol | Office Reference Number | FI         | Technical indication location |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------|-------------------------------|
| G01M 11/02                 |                       |                         | G01M 11/02 | A 2F065<br>B 2G086            |
| G01B 11/00                 |                       |                         | G01B 11/00 | C 5F046<br>B<br>Z             |

Request for examination: Not yet requested    No. of claims: 36 OL (Total of 22 pages)  
Continued to last page

|                          |                                    |                |   |
|--------------------------|------------------------------------|----------------|---|
| (21) Application No.     | Patent application no. 2000-216868 | (71) Applicant | 000004112<br>Nikon Corp.<br>3-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo           |
| (22) Date of Application | July 18, 2000                      | (72) Inventor  | Tsuneyuki Hagiwara c/o Nikon Corp.<br>3-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo |
|                          |                                    | (74) Agent     | Atsushi Tateishi, patent attorney   |
| (31) Priority Number     | No.2000-123553                     |                |   |
| (32) Priority Date:      | April 25, 2000                     |                |   |
| (33) Priority Country:   | Japan                              |                |   |

(54) Title of the invention: Aerial image measurement method, image forming properties measurement method, Aerial image measurement unit, and exposure apparatus

**(57) Abstract**

Purpose: To provide a measurement method which is capable of measuring an aerial image with a sufficient accuracy.

Configuration: On a slit plate 90 of an aerial image measurement unit 59, a slit 22 is formed extending in the Y-axis direction of which the width in the measurement direction (X-axis direction) is equal to or below (wavelength  $\lambda$ /numerical aperture N.A. of the projection optical system). Therefore, in a state where a predetermined pattern PM is illuminated with illumination light IL to form an aerial image of the pattern on an image plane via the projection optical system PL, and when the slit plate 90 is scanned in the X-axis direction with respect to the aerial image, the light having passed through the slit 22 during the scanning is photo-electrically converted with a photoelectric conversion element 24, and thus the photoelectric conversion signal (signal corresponding to the light intensity of an aerial image) is output. Further, based on the photoelectric conversion signal, the control unit measures the light intensity distribution corresponding to the aerial image. In this case, the width of slit 22 is equal to or below ( $\lambda$ /N.A.), and hence an aerial image with a sufficiently high accuracy for practical usage can be measured.

Scope of Patent Claims

Claim 1

An aerial image measurement method to measure an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical system, said measurement method including: illuminating said pattern with illumination light and forming an aerial image of said pattern on an image plane via said projection optical system; and scanning a slit plate, which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of said projection optical system of which a width perpendicular to said first direction within said two-dimensional plane serving as a second direction is set in consideration of a wavelength  $\lambda$  of said illumination light, in said second direction within a surface close to said image plane parallel to said two-dimensional plane, and photo-electrically converting said illumination light having passed through said slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of said illumination light having passed through said slit.

Claim 2

An aerial image measurement method to measure an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical system, said measurement method including: illuminating said pattern with illumination light and forming an aerial image of said pattern on an image plane via said projection optical system; and scanning a slit plate, which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of said projection optical system of which a width perpendicular to said first direction within said two-dimensional plane serving as a second direction is set in consideration of a numerical aperture N.A. of said projection optical system, in said second direction within a surface close to said image plane parallel to said two-dimensional plane, and photo-electrically converting said illumination light having passed through said slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of said illumination light having passed through said slit.

Claim 3

The aerial image measurement method according to claim 1 or 2, wherein said width of said slit in said second direction is greater than zero, and equal to or below said wavelength  $\lambda$  of said illumination light divided by said numerical aperture N.A. of said projection optical system ( $\lambda/N.A.$ ).

Claim 4

The aerial image measurement method according to claim 3, wherein said width of said slit in said second direction is equal to or below said ( $\lambda/N.A.$ ) multiplied by 0.8.

Claim 5

The aerial image measurement method according to claim 1 or 2, wherein said width of said slit in said second direction is half a minimum pitch multiplied by an odd number, said pitch being a pitch of a line and space pattern in a limit of resolution set by illumination conditions including properties of said illumination light and the type of said pattern.

Claim 6

The aerial image measurement method according to claim 1 or 2, wherein when a wavelength of said illumination light is expressed as  $\lambda$  and a numerical aperture of said projection optical system is expressed as N.A., said width of said slit in said second direction is set as  $\{\lambda/(2N.A.)\}$  multiplied by an odd number.

Claim 7

The aerial image measurement method according to any one of claims 1 to 6, said measurement method further including: obtaining a spatial frequency distribution by performing a Fourier Transform on said photoelectric conversion signal; converting said spatial frequency distribution into a spectrum distribution of its original aerial image by dividing said spatial frequency distribution with a frequency spectrum of said slit that is already known; and recovering said original aerial image by performing an inverse Fourier Transform on said spectrum distribution.

Claim 8

An image forming properties measurement method to measure image forming properties of a projection optical system, said measurement method including: illuminating a predetermined pattern with illumination light and forming an aerial image of said pattern on an image plane via said projection optical system; scanning a slit plate, which has at least one slit with a predetermined slit width extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of said projection optical system, within a surface close to said image plane parallel to said two-dimensional plane in a second direction which is perpendicular to said first direction, and photo-electrically converting said illumination light having passed through said slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of said illumination light having passed through said slit; and obtaining image forming properties of said projection optical system performing said photoelectric conversion signal by said predetermined treatment.

Claim 9

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern consists of a line and space pattern that has a periodicity in a direction corresponding to said second direction, detection of said photoelectric conversion signal is repeated a plurality of times while changing a position of said slit plate in a direction of said optical axis, Fourier Transformation is performed

respectively on a plurality of photoelectric conversion signals obtained by repeatedly performing said predetermined treatment in said detection; a contrast is obtained which is an amplitude ratio of a first order frequency component and a zero order frequency component of respective signals; and a position of said optical axis is detected which corresponds to a photoelectric conversion signal with said contrast maximized, to thereby detect a best focus position of a projection optical system.

Claim 10

The image forming properties measurement method according to claim 9, wherein said method further includes detecting an image plane shape of said projection optical system by repeatedly performing detection of said best focus position on a plurality of points distanced differently from an optical axis of said projection optical system.

Claim 11

The image forming properties measurement method according to claim 9, said measurement method further including: performing detection of said best focus position along an optical axis of said projection optical system repeatedly on a plurality of line and space patterns having a different pitch, and obtaining a spherical aberration of said projection optical system based on a difference of said best focus position corresponding to each of said patterns.

Claim 12

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern includes at least one rectangular pattern where a width in said second direction is larger than a width of said slit in said second direction; forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and a phase detection is performed based on a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment, a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated based on a result of said phase detection, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

Claim 13

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern includes at least one rectangular pattern where a width in said second direction is larger than a width of said slit in said second direction; forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and a phase detection is performed

based on an intersection point of each of a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment and a predetermined slice level, a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

Claim 14

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern is a rectangular shape as a whole, and consists of a line and space pattern having a periodicity in said first direction.

Claim 15

The image forming properties measurement method according to claim 14, wherein forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and based on an intersection point of each of a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment and a predetermined slice level, a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

Claim 16

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern consists of a line and space pattern having a periodicity in a direction corresponding to said second direction, and, an abnormal line width value of each line pattern is calculated based on an intersection point of said photoelectric conversion signals and a predetermined slice level by the predetermined treatment, and a coma aberration of said projection optical system is calculated based on a calculation result.

Claim 17

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern consists of a line and space pattern having a periodicity in a direction corresponding to said second direction, and a phase difference between a first fundamental frequency component of said photoelectric conversion signals corresponding to a pitch of each said line pattern and a second fundamental frequency component of said photoelectric conversion signals corresponding to an entire width of said line and space pattern is calculated by the predetermined treatment and said coma aberration of the projection optical system is calculated based on a calculation result.

Claim 18

The image forming properties measurement method according to claim 8, wherein said pattern is a symmetric mark having at least two types of a line pattern with a different line width arranged in a predetermined interval in a direction corresponding to said second direction, and a deviation of symmetry of an aerial image of said pattern is calculated based on an intersection point of said photoelectric conversion signals and a predetermined slice level by the predetermined treatment, and a coma aberration of said projection optical system is obtained based on a calculation result.

Claim 19

An aerial image measurement unit that measures an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical system, said measurement unit comprising: an illumination unit which illuminates said pattern to form an aerial image of said pattern onto an image plane via said projection optical system; a slit plate, which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of said projection optical system of which the width in a second direction being perpendicular to said first direction is greater than zero, and equal to or below said wavelength  $\lambda$  of said illumination light divided by said numerical aperture N.A. of said projection optical system ( $\lambda/N.A.$ ); a photoelectric conversion element which photo-electrically converts said illumination light having passed through said slit plate, and outputs a photoelectric conversion signal corresponding to a light intensity of said illumination light which has passed through said slit; and a processing unit which scans said slit plate in said second direction within said two-dimensional plane in the vicinity of said image plane in a state where said pattern is illuminated by said illumination unit and said aerial image is formed on said image plane, and measures a light intensity distribution corresponding to said aerial image based on said photoelectric conversion signal output from said photoelectric conversion element.

Claim 20

An exposure apparatus that transfers a circuit pattern formed on a mask onto a substrate via a projection optical system, said exposure apparatus comprising: a substrate stage which holds said substrate; and an aerial image measurement unit according to claim 19 which has an arrangement of said slit plate being integrally movable with said substrate stage.

Claim 21

The exposure apparatus according to claim 20, wherein said exposure apparatus further comprises a control unit which measures a light intensity distribution corresponding to aerial images of various mark patterns using said aerial

image measurement unit and obtains image forming properties of said projection optical system based on data of said light intensity distribution measured.

Claim 22

The exposure apparatus according to claim 20, said exposure apparatus further comprising: a mark detection system which detects a position of a mark on said substrate stage; and a control unit which detects a positional relationship between a projected position of said mask pattern by said projection optical system and said mark detection system using said aerial image measurement unit.

Detailed Description of the Invention

[0001]

Industrial Field of Utilization

The present invention relates to an aerial image measurement method, an image forming properties measurement method, an aerial image measurement unit, and an exposure apparatus,. More particularly, the present invention relates to an aerial image measurement method that measures an aerial image formed on an image plane by a projection optical system, an image forming properties measurement method that measures the image forming properties of the projection optical system utilizing the aerial image measurement method, an aerial image measurement unit to carry out the aerial image measurement method, and an exposure apparatus having the aerial image measurement unit.

[0002]

Prior Art

When devices such as a semiconductor device or a liquid crystal display device are conventionally manufactured in a photolithographic process, a projection exposure apparatus that transfers a pattern of a photomask or a reticle (hereinafter generally referred to as a "reticle") onto a substrate such as a wafer or glass plate on which a photosensitive agent such as a photoresist is coated on the surface via a projection optical system is used. The reduction projection exposure apparatus (generally referred to as a stepper) based on the step-and-repeat method, or the scanning projection exposure apparatus (generally referred to as a scanning stepper) based on the step-and-scan method are examples of such a projection exposure apparatus.

[0003]

In the case of manufacturing a semiconductor, or the like, it is necessary to overlay and form many layers of different circuit patterns on a substrate. Therefore, it is important to precisely overlay the reticle on which the circuit pattern is drawn with the pattern already formed on each shot area on the substrate. In order to perform such a precise overlay, it is a mandatory for the image forming characteristics of the projection optical system to be adjusted to a desired state.

[0004]

As a premise of adjusting the image forming characteristics of the projection optical system, the image forming characteristics have to be precisely measured. And as the measurement method of the image forming characteristics, the method is mainly used (hereinafter referred to as the "exposing method") where exposure is performed using a mask for measurement on which patterns for a predetermined measurement are formed, and the image forming characteristics are calculated based on measurement results of measuring a resist image, which is obtained by developing the substrate on which the projected image of the measurement pattern is transferred and formed. Other than this method, the method to calculate the image forming characteristics based on measurement results of measuring an aerial image (projection image) of the measurement pattern formed by the projection optical system by illuminating the mask for measurement with the illumination light (hereinafter referred to as the "aerial image measurement method") is also used, without substantial exposure.

[0005]

The conventional aerial image measurement was generally performed in the following manner. That is, for example, as is shown in FIG. 38A, an opening plate 123 on which a square opening 122 is formed, is arranged on a substrate stage. The opening plate 123 is scanned via the substrate stage in the direction indicated by the arrow A, with respect to the aerial image MP' of the measurement pattern on the reticle for measurement formed by the projection optical system (not shown in figures), and the illumination light which has passed through the opening 122 is photo-detected and photo-electrically converted by a photoelectric conversion element. With this photoelectric conversion, a photoelectric conversion signal (light intensity signal corresponding to the aerial image) as is shown in FIG. 38B, can be obtained. Next, by differentiating the waveform of the photoelectric conversion signal with reference to the main scanning direction shown in FIG. 38B, a differential waveform as is shown in FIG. 38C is obtained. And, based on the differential waveform, as is shown in FIG. 38C, a well-known predetermined signal processing such as the Fourier Transform Method is performed, and the optical image (aerial image) of the projected measurement marks is obtained.

[0006]

Details of such measurement of the aerial image and the detection of distortion and the like of the projection optical system based on this measurement are disclosed, for example, in Japanese Patent Laid Open (Unexamined) No. 10-209031.

[0007]

Problems to Be Solved by the Invention

With the conventional aerial image measurement method described above, however, since the aerial image intensity was measured by scanning a large opening as is shown in FIG. 38B, it turned out that a large scale of a low-frequency component was mixed in addition to the aerial frequency component that characterizes the profile of the aerial image. On the other hand, the dynamic range of the signal processing system arranged on the latter stage of the photoelectric conversion element is limited, and since the resolution of the signal processing system to the dynamic range is also limited (for example, around 16 bit at the current level), the S/N ratio of the signal component which reflects the profile of the aerial image turned out to be small. Therefore, the conventional aerial image measurement method was sensitive to noise, and the deterioration of the image profile was large when the aerial image was converted to the aerial image intensity signal, thus, it was difficult to measure the aerial image with a sufficient accuracy.

[0008]

Besides this method, conventionally, mainly for the purpose of detecting the image forming position of a pattern, details of a unit having a slit scanned with respect to the aerial image of the pattern are disclosed, for example, in Japanese Patent Laid Open No. 58-7823, and the like. With the unit disclosed in the publication, however, the width of the slit was set in correspondence with the shape of the mask pattern (reference pattern). Therefore, it was difficult to accurately measure the aerial image of patterns having various shapes (including sizes).

[0009]

The present invention has been made in consideration of the circumstances described above, and has as its first object the provision of an aerial image measurement method and an aerial image measurement unit that are capable of measuring an aerial image with a sufficient accuracy.

[0010]

The second object of the present invention is to provide an image forming properties measurement method that can accurately measure the image forming properties of the projection optical system.

[0011]

The third object of the present invention is to provide an exposure apparatus that contributes to improving the exposure accuracy.

[0012]

#### Means to Solve Problems

In general, the resolution (resolving power)  $R$  of a projection optical system in an exposure apparatus is expressed, well known as the Rayleigh criterion, as  $R=k \times \lambda / \text{N.A.}$  ( $\lambda$  is the wavelength of the illumination light, N.A. is the numerical aperture of the projection optical system, and  $k$  is a constant determined by the

photoresist process (the process coefficient) besides the resolution of the resist). The inventor focused on this point, and from the results of performing various experiments and the like, discovered that when the width of aperture used in aerial image measurement in the scanning direction was set considering at least either the illumination light wavelength  $\lambda$  or the numerical aperture N.A. of a projection optical system, a favorable result could be obtained in aerial image measurement. The aerial image measurement method related to the present invention is devised based on such new information by the inventor.

[0013]

According to the first aspect of this invention, there is provided an aerial image measurement method to measure an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical system (PL), the measurement method including: the step of illuminating the pattern with illumination light (IL) and forming an aerial image of the pattern on an image plane via the projection optical system; and the step of scanning a slit plate (90), which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of the projection optical system of which the width perpendicular to the first direction within the two-dimensional plane serving as a second direction is set in consideration of a wavelength  $\lambda$  of the illumination light, in the second direction within the two-dimensional plane close to the image plane, and photo-electrically converting the illumination light having passed through the slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of the illumination light having passed through the slit.

[0014]

With this method, the predetermined pattern is illuminated with the illumination light, and the aerial image of the pattern is formed on the image plane via the projection optical system. And, with respect to this aerial image, the slit plate is scanned in the second direction within the two-dimensional plane in the vicinity of the image plane. The slit plate, in this case, has at least one slit extending in the first direction within the two-dimensional plane perpendicular to the optical axis of the projection optical system of which the width perpendicular to the first direction within the two-dimensional plane serving as the second direction is set in consideration of the wavelength  $\lambda$  of the illumination light. Also, the illumination light having passed through the slit is photo-electrically converted and the photoconversion signal corresponding to the intensity of the illumination light that has passed through the slit is obtained. And, by performing a predetermined process on the photoconversion signal, the aerial image (image intensity distribution) can be obtained.

[0015]

That is, an aerial image of a predetermined pattern can be obtained based on the slit-scan method. In this case, since the width of the slit in the scanning direction is set with consideration of the wavelength of the illumination light, it becomes possible to measure the aerial image with sufficient accuracy.

[0016]

According to the first aspect of this invention, there is provided an aerial image measurement method to measure an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical system, the measurement method including: the step of illuminating the pattern with illumination light and forming an aerial image of the pattern on an image plane via the projection optical system; and the step of scanning a slit plate, which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of the projection optical system of which the width perpendicular to the first direction within the two-dimensional plane serving as a second direction is set in consideration of a numerical aperture N.A. of the projection optical system, in the second direction within the two-dimensional plane close to the image plane, and photo-electrically converting the illumination light having passed through the slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of the illumination light having passed through the slit.

[0017]

With this method, the predetermined pattern is illuminated with the illumination light, and the aerial image of the pattern is formed on the image plane via the projection optical system. And, with respect to this aerial image, the slit plate is scanned in the second direction within the two-dimensional plane in the vicinity of the image plane. The slit plate, in this case, has at least one slit extending in the first direction within the two-dimensional plane perpendicular to the optical axis of the projection optical system of which the width perpendicular to the first direction within the two-dimensional plane serving as the second direction is set in consideration of the numerical aperture N.A. of the projection optical system. Also, the illumination light having passed through the slit is photo-electrically converted and the photoconversion signal corresponding to the intensity of the illumination light that has passed through the slit is obtained. And, by performing a predetermined process on the photoconversion signal, the aerial image (image intensity distribution) can be obtained.

[0018]

That is, an aerial image of a predetermined pattern can be obtained based on the slit-scan method. In this case, since the width of the slit in the scanning direction is set with consideration of the numerical aperture N.A. of the projection optical system, it becomes possible to measure the aerial image with sufficient accuracy.

[0019]

With the aerial image measurement method according to the present invention recited in claims 1 and 2, as in the invention the first invention in claim 3, it is preferable for the width of the slit in the second direction to be greater than zero, and equal to or below the wavelength  $\lambda$  of the illumination light divided by the numerical aperture N.A. of the projection optical system ( $\lambda/\text{N.A.}$ ). In this case, a width of the scanning direction of the slit is set by considering both of the two parameters that affect resolution, that is, wavelength  $\lambda$  and a numerical aperture N.A., and hence the aerial image can be measured with high precision, even compared with claim 1 and 2. The reason for setting the width of the slit in the scanning direction equal to or below ( $\lambda/\text{N.A.}$ ), first of all, is because when the inventor repeatedly performed simulations and experiments under the conditions of the width of the slit in the scanning direction (referred to as 2D) as  $2D=f(\lambda/\text{N.A.})=n \cdot (\lambda/\text{N.A.})$ , favorable results (sufficiently practical results) were obtained in the case when the coefficient was  $n=1$ . And, secondly, as will be referred to later on, since the photoelectric conversion signal above is to become a convolution of the slit and the intensity distribution of the aerial image, from the aspect of measurement accuracy, the width of the slit in the scanning direction 2D is better when narrower.

[0020]

In this case, as in the invention recited in claim 4, it is further preferable for the width of the slit in the second direction to be equal to or below the ( $\lambda/\text{N.A.}$ ) multiplied by 0.8. As is mentioned above, from the aspect of measurement accuracy, the width of the slit in the slit is better when narrower, and according to the simulations and experiments performed by the inventor, it has been confirmed that the results are further practical when the width of the slit in the scanning direction 2D is equal to or below 80% of the ( $\lambda/\text{N.A.}$ ).

[0021]

When considering the limitations from the aspect of throughput, however, if the width 2D is too narrow, the light intensity of the light having passed through the slit becomes too weak, and difficult to measure, therefore, a width of a certain range is necessary.

[0022]

With the aerial image measurement method according to the invention recited in claims 1 and 2, as in the invention recited in claim 5, the width of the slit in the second direction may be half a minimum pitch multiplied by an odd number, the minimum pitch being a pitch of a line and space pattern in a limit of resolution set by illumination conditions including properties of the illumination light and the type of the pattern.

[0023]

In the case of a normal pattern without using the phase-shifting method, under the conditions of conventional illumination, the minimum pitch referred to above is almost equal to  $\lambda/N.A.$  Whereas, in the case of a phase-shifting pattern, that is, in the case of a phase-shifting mask (phase-shifting reticle) pattern employing the phase-shifting method, it is confirmed that the minimum pitch becomes almost  $\lambda/(2N.A.).$  As the phase-shifting mask, the half-tone type, or the Levenson type, can be listed.

[0024]

With the aerial image measurement method according to the invention recited in claims 1 and 2, as in the invention recited in claim 6, when a wavelength of the illumination light is expressed as  $\lambda$  and a numerical aperture of the projection optical system is expressed as  $N.A.$ , the width of the slit in the second direction may be set as  $\{\lambda/(2N.A.)\}$  multiplied by an odd number.

[0025]

With the aerial image measurement method according to the present invention recited in claims 1 to 6, as in the invention recited in claim 7, the measurement method can further include the steps of: obtaining a spatial frequency distribution by performing a Fourier Transform on the photoelectric conversion signal; converting the spatial frequency distribution into a spectrum distribution of its original aerial image by dividing the spatial frequency distribution with a frequency spectrum of the slit that is already known; and recovering the original aerial image by performing an inverse Fourier Transform on the spectrum distribution.

[0026]

According to this invention recited in claim 8, there is provided an image forming properties measurement method to measure image forming properties of a projection optical system, the measurement method including: the step of illuminating a predetermined pattern with illumination light and forming an aerial image of the pattern on an image plane via the projection optical system; the step of scanning a slit, which has at least one slit with a predetermined slit width extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of the projection optical system, within the two-dimensional plane close to the image plane in a second direction which is perpendicular to the first direction, and photo-electrically converting the illumination light having passed through the slit and obtaining a photoelectric conversion signal which corresponds to an intensity of the illumination light having passed through the slit; and the step of obtaining image forming properties of the projection optical system by repeatedly performing the predetermined treatment based on the photoelectric conversion signal.

[0027]

With this method, the predetermined pattern is illuminated with the illumination light, and the aerial image of the pattern is formed on the image plane via

the projection optical system. In this state, the slit plate is scanned within the two-dimensional plane close to the image plane in the second direction which is perpendicular to the first direction, and the illumination light having passed through the slit is photo-electrically converted and the photoelectric conversion signal which corresponds to the intensity of the illumination light having passed through the slit is obtained. In this case, the slit plate has at least one slit with a predetermined slit width extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of the projection optical system. And, based on the photodetection signal, the image forming properties of the projection optical system are obtained by repeatedly performing the predetermined treatment.

[0028]

That is, by the slit-scan method, the aerial image of the predetermined pattern can be obtained, and since the image forming properties of the projection optical system are obtained by repeatedly performing the predetermined treatment based on the obtained photodetection signal, it becomes possible to measure the image forming properties of the projection optical system with high precision.

[0029]

In this case, as in the invention recited in claim 9, the pattern can consist of a line and space pattern that has a periodicity in a direction corresponding to the second direction, detection of the photoelectric conversion signal can be repeated a plurality of times while changing a position of the slit plate in a direction of the optical axis, Fourier Transformation is performed respectively on a plurality of photoelectric conversion signals obtained by repeatedly performing said predetermined treatment in said detection; a contrast is obtained; which is an amplitude ratio of a first order frequency component and a zero order frequency component of respective signals and position of said optical axis is detected which corresponds to a photoelectric conversion signal which maximizes said contrast, to thereby detect a best focus position of a projection optical system. The contrast changes sensitively depending on the focus position (defocus amount); therefore, according to the present invention, the best focus position of the projection optical system can be accurately, and easily measured (set).

[0030]

In this case, as in the invention recited in claim 10, the method can further include the step of detecting an image plane shape of the projection optical system by repeatedly performing detection of the best focus position on a plurality of points distanced differently from an optical axis of the projection optical system. The image plane, or in other words, the best image forming plane, is a plane made up of a group of best focus points from innumerable points (that is, innumerable points that have different so-called image heights) of which the distance from the optical axis differs.

Therefore, by repeatedly performing detection of the best focus position on a plurality of points having a different distance from the optical axis of the projection optical system, and performing statistical processing based on the detection results, it becomes possible to obtain the image plane both easily and accurately.

[0031]

With the image forming properties measurement method according to the present invention recited in claim 9, as in the invention recited in claim 11, the measurement method can further include the step of: performing detection of the best focus position along an optical axis of the projection optical system repeatedly on a plurality of line and space patterns having a different pitch, and obtaining a spherical aberration of the projection optical system based on a difference of the best focus position corresponding to each of the patterns. The spherical aberration is a type of aperture aberration of the optical system, and is a phenomenon such that when light from object points on the optical axis having various apertures enters the optical system, the corresponding image point is not formed at one point. Accordingly, by repeatedly performing detection of the best focus position in the optical axis of the projection optical system on a plurality of line and space patterns having a different pitch, and based on the difference of the best focus position corresponding to each pattern obtained, the spherical aberration can be easily obtained by calculation.

[0032]

In this case, with the image forming properties measurement method according to the present invention recited in claim 8, as in the invention recited in claim 12, the pattern can include at least one rectangular pattern of which the width in the second direction is larger than a width of the slit in the second direction. Forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and a phase detection is performed based on a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment, a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated based on a result of said phase detection, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

[0033]

Distortion, here, is an aberration of the projection optical system, and when distortion occurs a line originally straight turns out to be a curved image in the periphery within the image field and the aerial image of the pattern is formed deviated (laterally shifted) from the predetermined position on the image plane, as is with the case when magnification error occurs.

[0034]

According to the invention, the positional deviation of the aerial image of the pattern projected at different positions within the image field of the projection optical system can be respectively obtained with high precision by the phase detection method. As a consequence, at least either the distortion or magnification can be measured with high precision. The reason for the pattern to include at least one rectangular pattern of which the width in the second direction is larger than that of the slit, is because if the width of the pattern in the second direction is narrower than the slit, it becomes difficult to accurately measure the distortion due to the influence of other aberrations, such as coma aberration.

[0035]

With the image forming properties measurement method according to the present invention recited in claim 8, as recited in claim 13, in this case, the pattern can include at least one rectangular pattern of which the width in the second direction is larger than a width of the slit in the second direction, forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated based on an intersection point of each of a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment and a predetermined slice level, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

[0036]

According to the invention, the position of the aerial image of a pattern projected at different positions within the image field of the projection optical system can be respectively obtained with high precision by the edge detection method using the slice method. As a result, the distortion can be measured with high precision. Here, it is the same reason as in Claim 12 that said pattern includes at least one rectangular pattern of which the width in said second direction is larger than a width of said slit in said second direction.

[0037]

With the image forming properties measurement method according to the invention recited in claim 8, as in the invention recited in claim 14, the pattern can have a rectangular shape as a whole, and can consist of a line and space pattern having a periodicity in the first direction. In such a case, for example, when performing detection of the aerial image of the predetermined pattern by the slit-scan method the slit is relatively scanned in the direction perpendicular to the periodic direction of the pattern. As a consequence, when a rectangular pattern that has the same shape as the

entire shape of the pattern is slit-scanned, a signal of a similar aerial image can be obtained. This, for example, allows aerial image measurement equal to when a BOX mark pattern of 10 square  $\mu\text{m}$  (an inner BOX mark) is used, without actually forming such a mark pattern, since such a mark pattern is difficult to form due to dishing occurring in the recent CMP process.

[0038]

In the case, as in the invention in claim 15, forming of said aerial image and detection of said photoelectric conversion signal are repeatedly performed on an aerial image of said pattern projected at different positions within an image field of said projection optical system, and a position of an aerial image individually corresponding to said plurality of photoelectric conversion signals is respectively calculated based on an intersection point of each of a plurality of photoelectric conversion signals obtained by said predetermined repeated treatment and a predetermined slice level, and at least one of a distortion and a magnification of said projection optical system is obtained based on said calculation results.

[0039]

With the image forming properties measurement method according to the invention recited in claim 8, as in the invention recited in claim 16, in the case that said pattern consists of a line and space pattern having a periodicity in a direction corresponding to said second direction, and, an abnormal line width value of each line pattern is calculated based on an intersection point of said photoelectric conversion signals and a predetermined slice level by performing the predetermined treatment, a coma aberration of said projection optical system is calculated based on a calculation result.

[0040]

The coma aberration is an aberration of the lens due to different magnifications in various zones of the lens, and occurs at the image portions far from the main axis of the projection optical system. Accordingly, at the position far from the optical axis, the line width of each line pattern becomes different depending on the coma aberration in the aerial image of the line and space pattern. According to the invention where the abnormal line width value of each line pattern is detected based on the edge detection method using the slice method, thus, it becomes possible to measure the coma aberration in a simple manner, with high accuracy.

[0041]

With the image forming properties measurement method according to the invention recited in claim 8, as in the invention recited in claim 17, in the case that said pattern consists of a line and space pattern having a periodicity in a direction corresponding to said second direction, a phase difference is calculated between a first fundamental frequency component of said photoelectric conversion signals

corresponding to a pitch of said line pattern and a second fundamental frequency component of said photoelectric conversion signals corresponding to an entire width of said line and space pattern by the predetermined treatment, and said coma aberration of the projection optical system is obtained based on a calculation result. The narrower the width of the line pattern of the aerial image is in the scanning direction, the more the influence of the coma increases. As a consequence, the effect on coma aberration on the aerial image of each of the line pattern of line and space is different from the effect on coma aberration on the aerial image of the pattern when setting the entire width of the line and space pattern as one pattern. Accordingly, a phase difference is calculated between a first fundamental frequency component of the photoelectric conversion signals corresponding to a pitch of line pattern and a second fundamental frequency component of the photoelectric conversion signals corresponding to an entire width of the line and space pattern. According to the invention where the coma aberration of the projection optical system can be calculated based on a calculation result, the coma aberration of the optical projection system can be obtained with high precision by the phase detection method.

[0042]

With the image forming properties measurement method according to the invention recited in claim 8, as in the invention recited in claim 18, in the case that said pattern is a symmetric mark pattern having at least two types of a line pattern with a different line width arranged in a predetermined interval in a direction corresponding to said second direction, a deviation of symmetry of an aerial image of said pattern is calculated, and a coma aberration of said projection optical system is obtained based on a calculation result, based on an intersection point of said photoelectric conversion signals and a predetermined slice level by the predetermined treatment.

The narrower the width of the line pattern of the aerial image is in the scanning direction, the more the aerial image of line pattern deviates by the influence of the coma. As a consequence, the symmetry of the aerial image of the symmetric mark pattern having a plurality of line pattern types with a different line width arranged in a predetermined interval in a direction corresponding to the scanning direction deviates greatly, the larger the coma is. Accordingly, by the edge detection method using the slice method, the deviation in symmetry of the symmetric mark pattern of the aerial image can be calculated, and based on the calculation results the coma of the projection optical system can be obtained, thus the coma of the projection optical system can be obtained with good accuracy.

[0043]

In the invention as recited in claim 19, an aerial image measurement unit measures an aerial image of a predetermined pattern formed by a projection optical

system, said measurement unit comprising: an illumination unit (10) which illuminates said pattern to form an aerial image of said pattern onto an image plane via said projection optical system; at least a slit plate (90), which has at least one slit extending in a first direction within a two-dimensional plane perpendicular to an optical axis of said projection optical system of which the width in a second direction being perpendicular to said first direction is greater than zero, and equal to or below said wavelength  $\lambda$  of said illumination light divided by said numerical aperture N.A. of said projection optical system ( $\lambda/N.A.$ ); a photoelectric conversion element (24) which photo-electrically converts said illumination light having passed through said slit plate, and outputs a photoelectric conversion signal corresponding to a light intensity of said illumination light which has passed through said slit; and a processing unit (20) which scans said slit plate in said second direction within said two-dimensional plane in the vicinity of said image plane in a state where said pattern is illuminated by said illumination unit and said aerial image is formed on said image plane, and measures a light intensity distribution corresponding to said aerial image based on said photoelectric conversion signal output from said photoelectric conversion element.

[0044]

With this unit, the illumination unit illuminates the predetermined pattern, and the aerial image of the pattern is formed on the image plane via the projection optical system. The processing unit then scans the slit plate that has at least one slit extending in the first direction within the two-dimensional plane perpendicular to the optical axis of the projection optical system in the second direction within the two-dimensional plane in the vicinity of the image plane with respect to the aerial image formed. And, the processing unit also measures the light intensity distribution corresponding to the aerial image based on the photoelectric conversion signal (electric signals of the illumination light having passed through the slit during scanning and photo-electrically converted) output from the photoelectric conversion element. That is, the aerial image of the predetermined pattern is measured in this manner, by the slit-scan method. In addition, in this case, since the width of the slit in the scanning direction formed on the slit plate is equal to or below ( $\lambda/N.A.$ ), the measurement of the aerial image can be performed with sufficiently practical high precision, as Claim 3.

[0045]

According to the invention as recited in claim 20, there is provided an exposure apparatus that transfers a circuit pattern formed on a mask (R) onto a substrate (W) via a projection optical system (PL), the exposure apparatus

comprising: a substrate stage (WST) which holds the substrate; and an aerial image measurement unit as recited in claim 19 which has an arrangement of the slit plate (90) being integrally movable with the substrate stage.

[0046]

With this apparatus, since it includes the aerial image measurement unit as recited in claim 18 that has an arrangement of the slit plate being integrally movable with the substrate stage, it becomes possible, for example, to form various measurement pattern on the mask and to measure the aerial image of the various measurement pattern with high precision by the aerial image measurement unit while moving the slit plate integrally with the substrate stage. Accordingly, it becomes possible to improve the exposure accuracy in the long run, by using the measurement results and performing, for example, initial adjustment of the image forming properties of the projection optical system and the like. As a consequence, this can lead to improving the yield of the exposing device high precision.

[0047]

In this case, as recited in claim 21, the exposure apparatus can further include a control unit (20) which measures a light intensity distribution corresponding to aerial images of various mark patterns using the aerial image measurement unit and obtains image forming properties of the projection optical system based on data of the light intensity distribution measured. In such a case, the control unit measures the light intensity distribution corresponding to the aerial images of various mark patterns, and based on the data of the light intensity distribution measured, the image forming properties of the projection optical system are obtained. Thus, it becomes possible to obtain the image forming properties of the projection optical system when necessary, and this allows adjustment of the image forming properties of the projection optical system prior to the beginning of exposure based on the obtained image forming properties. Accordingly, improving the exposure accuracy becomes possible.

[0048]

With the exposure apparatus according to the present invention recited in claim 20, as in the invention recited in claim 22, the exposure apparatus can further include: a mark detection system which detects a position of a mark on the substrate stage (ALG1 or ALG2); and a control unit which detects a positional relationship between a projected position of the mask pattern by the projection optical system and the mark detection system using the aerial image measurement unit. In such a case, the control unit detects the positional relationship between the projected position of the mask pattern by the projection optical system, or in other words, the image forming position of the aerial image of the pattern and the mark detection system (that is, the so-called baseline amount of the mark detection system) using the aerial image

measurement unit. Due to the controlling unit, on measuring the baseline amount, since the projection position of the mask pattern can be measured directly by the aerial image measurement unit, a baseline amount measurement with high accuracy is possible compared with the case when the projection position of the mask pattern is measured indirectly using the fiducial mark plate and the reticle microscope. Accordingly, by controlling the position of the substrate during exposure and the like using this baseline amount, the exposure accuracy can be improved due to improvement in the overlay accuracy of the mask and the substrate.

[0049]

### Embodiments

#### The First Embodiment

The first embodiment of the present invention will be described below with reference to FIGS. 1 to 34.

[0050]

FIG. 1 shows a schematic arrangement of an exposure apparatus 100 related to the first embodiment. The exposure apparatus 100 is a scanning projection exposure apparatus, that is, the so-called scanning stepper, based on the step-and-scan method.

[0051]

The exposure apparatus 100 includes: an illumination system 10, which includes a light source and an illumination optical system; a reticle stage RST, which holds the reticle R serving as a mask; a projection optical system PL; a wafer stage WST as a substrate stage, which holds the wafer W serving as a substrate and is capable of moving freely within an XY plane; and a control system and the like to control these parts.

[0052]

The illumination system 10 has a structure including: a light source; an illuminance uniformity optical system (made up of a collimator lens, a fly-eye lens, and the like); a relay lens system; a reticle blind serving as an illumination aperture stop; a condenser lens system; and the like (all are omitted in FIG. 1).

[0053]

As the light source, in this embodiment, an excimer laser light source that emits the KrF excimer laser beam (wavelength: 248 nm) or the ArF excimer laser beam (wavelength: 193 nm) is to be used as an example.

[0054]

The reticle blind is made up of a fixed reticle blind of which the opening shape is fixed (not shown in figures) and a movable reticle blind 12 of which the opening shape is variable (omitted in FIG. 1, refer to FIG. 2). The fixed reticle blind is arranged in the vicinity of the pattern surface of the reticle R or on a surface slightly defocused from the conjugate plane relative to the pattern surface of the reticle R, and

a rectangular opening which sets the rectangular slit-shaped illumination area IAR is formed on the reticle R. In addition, the movable reticle blind 12 is arranged on the conjugate plane relative to the pattern surface of the reticle R close to the fixed reticle blind, and has an opening that is variable in position, of which the directions correspond to the scanning direction (in this case, the Y-axis direction being perpendicular to the surface of FIG. 1) and the non-scanning direction (in this case, the X-axis direction being the horizontal direction in the surface of FIG. 1) during scanning exposure, and in width.

[0055]

With the illumination system 10, the illumination light, which is generated at the light source and serves as the exposure light (hereinafter referred to as the "illumination light IL"), passes through a shutter (not shown in figures) and then is converted to a beam having an almost unified illumination distribution by the illuminance uniformity optical system. The illumination light IL emitted from the illuminance uniformity optical system reaches the reticle blind through the relay lens system. After passing through the reticle blind, the illumination light IL passes through the relay lens system, the condenser lens system, and then illuminates the illumination area IAR (illumination region of square-shaped slit being elongated to X-axis direction and having a predetermined width to Y-axis direction) of the reticle R, on which the circuit pattern, or the like is drawn, with a uniform illuminance.

[0056]

The main controller 20 controls the movable reticle blind 12 at the beginning and end of scanning exposure, and by further restricting the illumination area IAR, exposure on unnecessary portions is to be avoided. In addition, in this embodiment, the movable reticle blind 12 is also used to set the illumination area when the aerial image is measured with the aerial image measurement unit, which will be described later on in the description.

[0057]

On the reticle stage RST, the reticle R is fixed by, for example, vacuum chucking (or electrostatic adsorption). The reticle stage RST, in this case, can be finely driven two-dimensionally (in the X-axis direction, the Y-axis direction perpendicular to X-axis, and the rotational direction ( $\theta_z$  direction) around the Z-axis perpendicular to XY plane) within an XY plane that is perpendicular to the optical axis AX of the projection optical system PL (to be described later) by a reticle stage driving system not shown, which includes a linear motor and the like. The reticle stage RST is also movable in the Y-axis direction at a designated scanning velocity on a reticle base not shown. The reticle stage RST has a movement stroke of Y direction such that the entire reticle R crosses the optical axis of at least the projection optical system PL.

[0058]

On the reticle stage RST, a movable mirror 15 is fixed to reflect the laser beam emitted from the reticle laser interferometer (hereinafter referred to as "reticle interferometer") 13. The position of the reticle stage RST within the XY plane is detected at all times by the reticle interferometer 13 at, for example, a resolution of around 0.5 to 1 nm. In actual, on the reticle stage RST, a movable mirror having a reflection surface perpendicular to the scanning direction (the Y-axis direction) during scanning exposure and a movable mirror having a reflection surface perpendicular to the non-scanning direction (the X-axis direction) are arranged, as well as the reticle interferometer 13 being arranged on at least one axis in the Y-axis direction and at least two axes in the X-axis direction. In FIG. 1, however, these are representatively indicated as the movable mirror 15 and the reticle interferometer 13.

[0059]

The positional information of the reticle stage RST is sent from the reticle interferometer 13 to the main controller 20, which consists of a workstation (or a microcomputer). The main controller 20 then controls and drives the reticle stage RST via the reticle stage driving system, based on the positional information of the reticle stage RST.

[0060]

The projection optical system PL is arranged below the reticle stage RST as is shown in FIG. 1, and the direction of the optical axis AX is the Z-axis direction. The projection optical system is a double telecentric reduction system, and employs a refraction optical system made up of a plurality of lens elements arranged along the direction of the optical axis AX in predetermined intervals. The projection magnification of the projection optical system PL is, for example, 1/5. Therefore, when the illumination light IL from the illumination system 10 illuminates the slit-shaped illumination area IAR on the reticle R, the illumination light IL which passes through the reticle R forms a reduced image (a partial inverted image) of the circuit pattern of the reticle R corresponding to the inner area of the illumination area IAR via the projection optical system PL, on an exposure area IA of the wafer W, which is conjugate to the illumination area IAR and has a photoresist coated on its surface.

[0061]

The wafer stage WST is driven freely along the upper surface of a stage base 16 within the XY two-dimensional plane (including the  $\theta_z$  rotation) by a wafer stage driving system (not shown in figures) made up of, for example, a two-dimensional magnetically levitated linear actuator. The two-dimensional magnetically levitated linear actuator has a Z driving coil, in addition to the X driving coil and Y driving coil. Therefore, the wafer stage WST can be finely driven in directions of three degrees of freedom, in the Z,  $\theta_x$ , and  $\theta_y$ .

[0062]

On the wafer stage WST, a wafer holder 25 is arranged, and the wafer holder 25 holds the wafer W by, for example, vacuum chucking (or electrostatic adsorption).

[0063]

In the case of using a two-dimensional moving stage which can be driven only within the XY two-dimensional plane by a driving system such as a linear motor or a planar motor, instead of the wafer stage WST, the wafer holder 25 may be mounted on the two-dimensional moving stage via a Z leveling table. The Z leveling table is capable of being finely driven in directions of three degrees of freedom, in the Z,  $\theta_x$ , and  $\theta_y$  directions, by for example, a voice coil motor and the like.

[0064]

On the wafer stage WST, a movable mirror 27, which reflects the laser beam from the wafer laser interferometer (hereinafter referred to as a "wafer interferometer") 31, is arranged. The wafer interferometer 31, which is arranged external to the wafer stage WST, detects the position of the wafer stage WST at all times in XY plane, at a resolution of, for example, around 0.5 to 1 nm.

[0065]

In actual, on the wafer stage WST, a movable mirror having a reflection surface perpendicular to the scanning direction which is the Y-axis direction on scanning exposure and a movable mirror having a reflection surface perpendicular to the non-scanning direction which is the X-axis direction are arranged, in addition to the wafer interferometer 31 being arranged respectively in one-axis in the Y-axis direction and two axes in the X-axis direction. In FIG. 1, however, these are representatively indicated as the movable mirror 27 and the wafer interferometer 31. The positional information (or the velocity information) of the wafer stage WST is sent to the main controller 20, and the main controller 20 controls the position of the wafer stage WST within the XY plane via the wafer stage driving system (not shown in figures), based on the positional information (or the velocity information).

[0066]

In addition, an aerial image measurement unit 59 is partially arranged on the wafer stage WST. The aerial image measurement unit 59 is used to measure the image forming properties of the projection optical system PL, and the structure will now be described in detail. As is shown in FIG. 2, the aerial image measurement unit 59 is provided in a projected portion 58a, which is arranged projecting on the upper surface of the wafer stage WST on one end of the stage and has an opening formed on the upper side. The aerial image measurement unit 59 is fitted into the opening from above so as to seal opening of the projected portion 58a, and is made up of a photodetection glass 82 being rectangular in a planar view and a reflection film 83 also serving as a light shielding film, which is formed on the upper surface of the

photodetection glass 82. And a slit 22 is formed on a part of the reflection film 83. Within the wafer stage WST underneath the slit 22, a relay optical system (84, 86) made up of the lenses 84 and 86, is arranged with the mirror 88 (herein, photo-detected optical system is constituted by lenses 84, 86 and mirror 88) in between to horizontally deflect the optical path of the illumination light (image light) that has been relayed for a predetermined optical path is fixed, and an optical sensor 24, or the like is contained as a photoelectric conversion device.

[0067]

As the material for the photodetection glass 82, in this embodiment, materials such as synthetic quartz or fluorite that have high transmittance to the KrF excimer laser beam or the ArF excimer laser beam, is to be used. As the optical sensor 24, a photoconversion element (photodetection element) capable of accurately detecting faint light, such as a photo multiplier tube is used. Further, in the embodiment a slit plate is formed by a photodetection glass 82 and a reflection film 83. In the following description, a slit plate formed by a photodetection glass 82 and a reflection film 83 is suitably referred to as "slit plate 90". Further, as described above, the slit 22 is formed in the reflection film 83, but it will be considered and described that the slit 22 is formed in the slit plate 90 for convenience in the following.

[0068]

In the embodiment, with the aerial image measurement unit 59 that has the arrangement described above, on measuring the projected image (aerial image) of the measurement marks formed on the reticle R via the projection optical system PL (this will be described later), when the illumination light IL having passed through the projection optical system PL illuminates the slit plate 90 constituting the aerial image measurement unit 59, the illumination light IL that has passed through the slit 22 on the slit plate 90 is photo-detected in the optical sensor 24 through the photodetection optical system (84, 86, 88) and the photoelectric conversion signals P (light amount signals) from the optical sensor 24 according to the photo-detected amount are output to the main controller 20.

[0069]

Further, the optical sensor 24 need not be provided in the wafer stage WST, for example, in the same manner as the aerial image measurement unit 59' shown in FIG. 3, the optical sensor 24 may be disposed in the outside of the wafer stage WST. That is, as is shown in FIG. 3, on the wafer stage WST, two projected portions 58a and 58b are arranged, with the upper surface of the projected portions 58a and 58b arranged at almost the same surface as the wafer W surface. Likewise with the case in FIG. 2, a slit plate 90 having an identical arrangement is arranged in the projected portion 58a, and underneath the slit plate 90 inside the wafer stage WST, lenses 84 and 86, and a mirror 88 are arranged in an identical positional relationship as in FIG.

2. In this case, however, within the wafer stage WST, a light guide 85 is also housed. The light entering end 85a of the light guide 85 is arranged at a position conjugate to the photo-detecting plane where the slit 22 is formed. In addition, the outgoing end 85b of the light guide 85 is arranged almost directly under the light transmittance lens 87, which is fixed to the upper surface of the projected portion 58b.

[0070]

Above the light transmittance lens 87, a photodetection lens 89 of which the diameter is larger than that of the light transmittance lens 87 is arranged. And further above the photodetection lens 89 at a position conjugate to the outgoing end 85b, an optical sensor 24 is arranged. The photodetection lens 89 and the optical sensor 24 are housed in a case 92 with the positional relationship described above maintained, and the case 92 is fixed to a fixed member (not shown in figures).

[0071]

With the aerial image measurement unit 59' indicated in FIG. 3, as described below, on measuring the projected image (aerial image) of the measurement pattern formed on the reticle R via the projection optical system PL, when the illumination light IL having passed through the projection optical system PL illuminates the slit plate 90 that structure the aerial image measurement unit 59', the illumination light IL that has passed through the slit 22 on the slit plate 90 is incident on the light entering end 85a of the light guide 85 after passing through the lens 84, the mirror 88, and the lens 86. The light guided by the light guide 85 is guided out of the wafer stage WST via the light transmittance lens 87, after being emitted from the outgoing end 85b of the light guide 85. And the light guided outside the wafer stage WST is photo-detected by the optical sensor 24 via the photodetection lens 89, and the photoelectric conversion signals (light amount signals) P from the optical sensor 24 corresponding to the photo-detected amount is sent to the main controller 20.

[0072]

In this case, measurement of the projected image of the measurement pattern is to be performed based on the slit-scan method, therefore, during this operation the photodetection lens 89 and the optical sensor 24 is to move with respect to the light transmittance lens 87. So, with the aerial image measurement unit 59', the size of each lens is set so that all light having passed through the light transmittance lens 87, which moves within a predetermined range, is incident on the photodetection lens 89.

[0073]

With the aerial image measurement unit 59', a light guiding portion is structured to guide the light that has passed through the slit 22 out of the wafer stage WST by the slit plate 90, the lenses 84 and 86, and the mirror 88, the light guide 85, and the light transmittance lens 87. A photodetection portion is structured to photodetect light which is guided outside the wafer stage WST by the photodetection

lens 89 and the optical sensor 24. In this case, as well, the light guiding portion and the photodetection portion referred to earlier are mechanically separate. And the light guiding portion and the photodetection portion are optically connected via the light transmittance lens 87 and the photodetection lens 89 only when the aerial image measurement is performed.

[0074]

That is, with the aerial image measurement unit 59', since the optical sensor 24 is arranged at a predetermined position external to the wafer stage WST, the heat generated by the optical sensor 24 does not have an adverse effect on the measurement precision and the like of the laser interferometer 31. In addition, since the external portion and the internal portion of the wafer stage WST is not connected with a light guide and the like, the driving accuracy of the wafer stage WST is not adversely affected as in the case when the external portion and the internal portion of the wafer stage WST is connected with a light guide and the like.

[0075]

Details on the shape, size and the like of the slit 22 formed on the slit plate 90 structuring the aerial image measurement unit 59 (or 59'), the aerial image measurement method using the aerial image measurement unit 59 (or 59'), and the measurement method of the image forming characteristics will be described later in the description.

[0076]

Referring back to FIG. 1, on the side surface of the projection optical system PL, an off-axis alignment microscope ALG1 serving as a mark detection system to detect the alignment marks on the wafer W (position alignment mark) is arranged. In this embodiment, as the alignment microscope ALG1, an alignment sensor based on the image processing method, or the so-called FIA (Field Image Alignment) system is used. As is shown in FIG. 2, the structure of the alignment microscope ALG1 includes an alignment light source 32, a half mirror 34, a first objective lens 36, a second objective lens 38, a pickup device (CCD) 40, and the like. As the alignment light source 32, a light source that emits a broadband illumination light such as a halogen lamp is used. With the alignment microscope ALG1, as is shown in FIG. 4, the illumination light emitted from the light source 32 illuminates the alignment mark Mw on the wafer W via the half mirror 34 and the first objective lens 36, and the light reflected off the alignment mark portion is photo-detected by the pickup device 40 via the first objective lens 36, half mirror 34, and the second objective lens 38. In this manner, the bright-field image of the alignment mark Mw is formed on the photodetection surface of the pickup device. And the photoelectric conversion signals corresponding to the bright-field image, in other words, the light intensity signals corresponding to the reflection image of the alignment mark Mw are sent to the main

controller 20 from a pick up device 40. The main controller 20 then calculates the position of the alignment mark Mw with the detection center of the alignment microscope ALG as the reference based on the light intensity signals. It also calculates the coordinate position of the alignment mark Mw in the stage coordinate system set by the optical axis of the wafer interferometer 31, based on the calculation results on the position of the alignment mark Mw and the positional information on the wafer stage WST which is output from the wafer interferometer 31.

[0077]

Furthermore, as is shown in FIG. 1, the exposure apparatus 100 in this embodiment has a light source of which on/off is controlled by the main controller 20, and a multiple focus position detection system (a focus sensor) based on the oblique incident method is arranged, consisting of an irradiation optical system 60a which irradiates light from an incident direction with respect to the optical axis AX to form multiple pinhole or slit images toward the image forming plane of the projection optical system PL, and of a photodetection optical system 60b which photo-detects the light reflected off the surface of the wafer W. By controlling the tilt of the plane-parallel plate arranged within the photodetection optical system 60b (not shown in figures) with respect to the optical axis of the reflected light, the main controller 20 provides an offset corresponding to the focus change of the projection optical system PL to the focus detection system (60a, 60b) and performs calibration. Details on the structure of the multiple focus position detection system (a focus sensor) similar to the focus detection system (60a, 60b) used in the embodiment, are disclosed in, for example, Japanese Patent Laid Open No. 06-283403.

[0078]

In the main controller 20, the multiple focus position detection system controls the movement of the wafer stage WST in the Z-position and the pitch amount and rolling amount (that is, rotation in the  $\theta_x$  and  $\theta_y$  directions) via the wafer stage driving system (not shown in figures), so that the defocus becomes zero based on defocus signals from the photodetection optical system 60b such as the S-curve signals upon scanning exposure (to be described later), and thereby to perform automatic focusing, in addition to automatic leveling.

[0079]

Following is a brief description of the operations in the exposure process of the exposure apparatus 100 in this embodiment.

[0080]

First of all, the reticle R is carried by a reticle carriage system (not shown in figures) and is held by adsorption on the reticle stage RST at the loading position. The main controller 20 then controls the position of the wafer stage WST and the reticle stage RST, measures (refer to FIG. 2) the projected image (aerial image) of the

reticle alignment marks (not shown in figures) formed on the reticle R using the aerial image measurement unit 59 in the manner which will be described later on, and obtains the projection position of the reticle pattern image. That is, the reticle alignment is performed.

[0081]

Next, the main controller 20 moves the wafer stage WST so that the aerial image measurement unit 59 is positioned directly below the alignment microscope ALG1, where the alignment optical system ALG1 detects the position of the slit 22, which is the positional reference of the aerial image measurement unit 59. In FIG. 5 it is represented that the slit 22 is detected by the alignment optical system ALG1. The main controller 20 obtains the positional relationship between the projection position of the pattern image of the reticle R and the alignment optical system ALG1 based on the detection signals of the alignment microscope ALG1, the measurement values of the wafer interferometer 31 in this state, and the projection position of the reticle pattern image previously obtained. In other words, the baseline amount of the alignment microscope ALG1 is obtained.

[0082]

When such baseline measurement is completed, the main controller 20 performs wafer alignment such as EGA (Enhanced Global Alignment), which details are disclosed in, for example, Japanese Patent Laid Open No. 61-44429 and the position of all the shot areas on the wafer W is obtained. Upon this wafer alignment, of the plurality of shot as on the wafer W, the wafer alignment mark Mw of a predetermined sample shot area decided in advance is measured in the manner described earlier (refer to FIG. 2) with the alignment microscope ALG1.

[0083]

The main controller 20 then sets the reticle stage RST to the scanning starting position and also sets the wafer stage WST to the scanning starting position to expose the first shot area, based on the positional information on each shot area on the wafer W and the baseline amount obtained above while monitoring the positional information sent from the interferometers 31 and 13.

[0084]

That is, the main controller 20 starts the relative scanning in opposite directions between the reticle stage RST and the wafer stage WST along the Y-axis, and when both stages RST and WST respectively reach their target scanning velocities, the exposing light EL starts to illuminate the pattern area of the reticle R, thus scanning exposure begins. Prior to this scanning exposure, the light source starts emitting light, however, since the main controller 20 controls the movement of each blade of the movable reticle blind constituting the reticle blind in synchronous with the movement of the reticle stage RST, irradiation of the exposure light EL on areas

other than the pattern area on the reticle R can be prevented likewise with the scanning steppers in general.

[0085]

The main controller 20 synchronously controls the reticle stage RST and the wafer stage WST so that especially during the scanning exposure described above, the movement velocity  $V_r$  in the Y-axis direction of the reticle stage RST and the movement velocity  $V_w$  in the X-axis direction of the wafer stage WST are maintained at a velocity ratio which corresponds to the projection magnification of the projection optical system PL.

[0086]

Then, different areas in the pattern area of the reticle R are sequentially illuminated with the ultraviolet pulse light, and by completing illumination of the entire pattern area, scanning exposure on the first shot area on the wafer W is consequently completed. In this manner, the circuit pattern of the reticle R is reduced and transferred onto the first shot area via the projection optical system PL.

[0087]

When scanning exposure on the first shot area is completed in this manner, stepping operation is performed between shot areas to move the wafer stage WST to the scanning starting position for exposure on the second shot area. And scanning exposure is similarly performed as above on the second shot area. From then onward, on and after the third shot area, the same operation is performed.

[0088]

Thus, the stepping operation in between shot areas and the scanning exposure operation on the shot area are repeatedly performed, and the pattern of the reticle R is transferred onto all the shot areas on the wafer W by the step-and-scan method.

[0089]

During the scanning exposure described above, interval between the wafer W surface and the projection optical system PL (the image plane thereof), and tilt with reference to XY plane (the image plane) are measured using the focus sensor (60a, 60b) integrally fixed to the projection optical system PL, and the wafer stage WST is controlled such that interval between wafer W surface and projection optical system PL by the main controller 20, and parallelity are constant all the time.

[0090]

In order to accurately overlay the pattern of the reticle R onto the pattern already formed on the shot area on the wafer W during the scanning exposure described above, it is important for the image forming properties (including the image forming characteristics) of the projection optical system PL and the baseline amount to be accurately measured, and the image forming properties of the projection optical system PL to be adjusted to a desired state.

[0091]

In this embodiment, the aerial image measurement unit 59 or 59' (hereinafter, typically refer to "aerial image measurement unit 59") referred to earlier is used to measure the image forming properties. The aerial image measurement by the aerial image measurement unit 59 and the measurement, or the like of the image forming properties of the projection optical system PL will now be described in detail.

[0092]

FIG. 2 shows a state where the aerial image of the measurement pattern formed on the reticle R is being measured using the aerial image measurement unit 59. As reticles R, it is possible to use a reticle made solely for aerial image measurement, or a reticle used for manufacturing a device that has the measurement mark only for measurement formed on the reticle. Instead of these reticles, fixed mark plate (refer to reticle fiducial mark plate) which is composed of glass material having the same as reticle in reticle stage RST is provided, and the measurement mark (measurement pattern) may be formed in the mark plate.

[0093]

As in shown FIG 2, the measurement pattern PM which is composed of line and space mark with the pediodicity in the X-axis direction at the predetermined portion is formed in the reticle R. Further, as shown in FIG. 6A, the slit 22 which extends to the Y-axis direction and has the prescribed width 2D is formed in the slit plate 90 of the aerial image measurement unit 59. Further, hereinafter, line and space is referred to as "L/S" suitably.

[0094]

When the aerial image is measured, the main controller 20 drives the movable reticle blind 12 via the blind driving unit (not shown in figures), and the illumination area of the illumination light IL of the reticle R is restricted only to the measurement pattern PM, as is shown in FIG. 2. In this state, when the illumination light IL is irradiated on the reticle R, the light (the illumination light IL) diffracted and scattered by the measurement pattern PM is refracted by the projection optical system PL as is shown in FIG. 2, and the aerial image (projected image) PM' of the measurement mark PM is formed on the image plane of the projection optical system PL. At this point, the wafer stage WST is to be positioned so that the aerial image PM' is formed on the +X side (or the -X side) of the slit 22 on the slit plate 90 of the aerial image measurement unit 59. FIG. 6A is a planar view of the aerial image measurement unit 59 in such a state.

[0095]

And, when the main controller 20 drives the wafer stage WST in the +X direction via the wafer stage driving system, as is indicated with the arrow F in FIG. 6A, the slit 22 is scanned in the X-axis direction with respect to the aerial image PM'.

During this scanning, the light (illumination light IL) which passes through the slit 22 is photo-detected by the optical sensor 24 via the photodetection optical system within the wafer stage WST (in the case of FIG. 3, light guiding portion and photodetection lens), and the photoelectric conversion signals are sent to the main controller 20. The main controller 20 then measures the light intensity distribution corresponding to the aerial image PM' through signal processing system not shown, based on the photoelectric conversion signals.

[0096]

FIG. 6B shows and example of a photoelectric conversion signal (light intensity signal) P that can be obtained on the aerial image measurement described above.

[0097]

In this case, the image of the aerial image PM' averages, due to the influence of the width (2D) of the slit 22 in the scanning direction (not the scanning direction in scanning and exposure, but the scanning direction with reference to the aerial image, that is X-axis direction).

[0098]

Accordingly, when the slit is expressed as  $p(x)$ , the intensity distribution of the aerial image as  $i(x)$ , and the observed light intensity signal as  $m(x)$ , the relation of the intensity distribution  $i(x)$  of the aerial image with the observed light intensity signal  $m(x)$  can be expressed as the following equation (1). In equation (1), the unit of the intensity distribution  $i(x)$  and the observed light intensity signal  $m(x)$  is the intensity per unit length.

[0099]

[Formula 1]

$$m(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x-u) \cdot i(u) du \quad \dots(1)$$

[0100]

[Formula 2]

$$p(x) = \begin{cases} 1(|x| \leq D) \\ 0(|x| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

[0101]

That is, the observed light intensity signal  $m(x)$  is a convolution of the slit  $p(x)$  and the intensity distribution of the aerial image  $i(x)$ .

[0102]

Accordingly, it is better for the width of the slit 2D in the scanning direction (hereinafter simply referred to as "slit width") to be narrower, from the aspect of measurement precision.

[0103]

The inventor repeatedly performed various simulations and experiments, or the like expressing the slit width 2D using the wavelength  $\lambda$  of the illumination light IL and the function  $f(\lambda/\text{N.A.})$  of the numerical aperture N.A. of the projection optical system PL. As a result, it was confirmed that in the case the slit width 2D is  $2D=n\cdot(\lambda/\text{N.A.})$  and the coefficient also  $n=<1$ , the experiment proved to be sufficiently practical, and especially when the coefficient is  $n=<0.8$ , proved to be more practical. "Practical", in this case, means that deterioration of the image profile is small when converting the aerial image into the aerial image intensity signal, therefore, the signal processing system arranged after the optical sensor 24 (photoelectric conversion element) does not require a dynamic range and a sufficient precision can be acquired.

[0104]

An example of the favorable result described above, is shown, for example, in the following Table 1.

[0105]

[TABLE 1]

| Wavelength (nm) | Numerical Aperture of projection lens | (A) Wavelength/Numerical Aperture (nm) of projection lens | B=A×0.8 |
|-----------------|---------------------------------------|---|---------|
| 248             | 0.68                                  | 364   | 291     |
| 248             | 0.75                                  | 331   | 264     |
| 193             | 0.65                                  | 297   | 238     |
| 193             | 0.75                                  | 257   | 206     |
| 193             | 0.85                                  | 227   | 182     |

[0106]

As can be seen from Table 1, the substantial slit width (aperture size: B in Table 1) differs depending on the numerical aperture and the wavelength, however, the appropriate value is generally 300 nm or under. Slits of this range can be made using the chromium reticle (also called mask blanks) on the market.

[0107]

A chromium reticle usually has a thick chromium layer of around 100 nm formed on a quartz substrate by vapor deposition. The standard thickness of a quartz substrate is 2.286 mm, 3.048 mm, 4.572 mm, or 6.35 mm.

[0108]

The slit width 2D is better when narrower, as is described earlier in the description, and even though the slit width is very narrow in the same manner as the embodiment, in the case when a photo multiplier is used as the optical sensor 24, it is

possible to detect the light amount (light intensity) by decreasing the scanning velocity and taking time for measurement. In actual, however, since the scanning velocity of the aerial image measurement has fixed limitations from the aspect of throughput, if the slit width 2D is too narrow the light amount transmitting the slit 22 decreases too much, thus measurement becomes difficult.

[0109]

From the information the inventor acquired by simulations and experiments, or the like the optimum value of the slit width 2D was confirmed to be around half the limit of resolution pitch (pitch of the L/S patterns) of the exposure apparatus. The details on this will be described later.

[0110]

As is obvious from the description so far, in this embodiment, the aerial image measurement unit is made up of the illumination optical system 10, the aerial image measurement unit 59 (including the slit plate 90 and the optical sensor 24), the wafer stage WST, and the main controller 20. In addition, the processing unit, which is a part of the aerial image measurement unit, is configured of the main controller 20.

[0111]

The aerial image measurement unit and the aerial image measurement method as described above is used, for example, on a. detecting the best focus position, b. detecting the image forming position of the pattern image, and c. baseline measurement of the alignment microscope ALG.

[0112]

Since item c. baseline measurement of the exposure apparatus 100 in this embodiment has already been explained, following will be a description of item a. detecting the best focus position and item b. detecting the image forming position of the pattern image, referring to working examples.

#### Detection of the Best Focus Position

This detection of the best focus position is used for purposes such as: A. detecting the best focus position of the projection optical system PL and detecting the best image forming plane (image plane), and B. the spherical aberration measurement.

[0113]

FIG. 7 to FIG. 12 show the image forming simulation results that correspond to the case when an aerial image of a L/S mark having a 50% duty ratio and a line width of 0.2  $\mu$ m measured with the aerial image measurement method described above. The conditions of this simulation are; illumination light wavelength 248 nm, N.A. of the projection optical system 0.68, illumination coherence factor  $\sigma=0.85$ , and the slit width 2D=0.3  $\mu$ m. These conditions are close to the conditions B in Table 1.

In FIG. 7 to FIG. 12, the horizontal axis shows the Y position ( $\mu\text{m}$ ) of the slit, and the vertical axis shows the light intensity (energy value).

[0114]

FIG. 7 shows the simulation results at the best focus position. In FIG. 7, the waveform P2 indicated by the solid line is an aerial image of L/S marks with the line width of  $0.2 \mu\text{m}$ , which corresponds to  $i(x)$  in equation (1). The waveform P3 indicated by the dotted line is the light intensity signal obtained by scanning the slit (aerial image measurement) that correspond to  $m(x)$  in equation (1).

[0115]

FIG. 8 shows the aerial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal P3 in FIG. 7, that is, on  $m(x)$ , along with the original intensity signal P3. In FIG. 8, the waveform P4 indicated by the broken line is a zero order frequency component, whereas, the waveform P5 indicated by the dashed-dotted line is a first order frequency component, the waveform P6 indicated by the dashed-double-dotted line is a second order frequency component, and the waveform P7 indicated by the solid line is a third order frequency component. In FIG. 8, waveforms P4 to P7 are shown raised by 1.0, so that they are made distinguishable.

[0116]

FIG. 9 shows the simulation results when the position is defocused by  $0.2 \mu\text{m}$  from the best focus position. In FIG. 9, the waveform P2 indicated by the solid line is an aerial image of L/S marks with the line width of  $0.2 \mu\text{m}$ , which corresponds to  $i(x)$  in equation (1), and the waveform P3 indicated by the dotted line is the light intensity signal obtained by scanning the slit (aerial image measurement) that correspond to  $m(x)$  in equation (1).

[0117]

FIG. 10 shows the aerial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal P3 in FIG. 9, along with the original intensity signal P3. In FIG. 10, the waveform P4 indicated by the broken line is a zero order frequency component, whereas, the waveform P5 indicated by the dashed-dotted line is a first order frequency component, the waveform P6 indicated by the dashed-double-dotted line is a second order frequency component, and the waveform P7 indicated by the solid line is a third order frequency component. In FIG. 10, waveforms P4 to P7 are shown raised by 1.0, so that they are made distinguishable.

[0118]

FIG. 11 shows the simulation results when the position is defocused by  $0.3 \mu\text{m}$  from the best focus position. In FIG. 11, the waveform P2 indicated by the solid line is an aerial image of L/S marks with the line width of  $0.2 \mu\text{m}$ , which corresponds to  $i(x)$  in equation (1), and the waveform P3 indicated by the dotted line is the light

intensity signal obtained by scanning the slit (aerial image measurement) that correspond to  $m(x)$  in equation (1).

[0119]

And, FIG. 12 shows the aerial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal P3 in FIG. 11, along with the original intensity signal P3. In FIG. 12, the waveform P4 indicated by the broken line is a zero order frequency component, whereas, the waveform P5 indicated by the dashed-dotted line is a first order frequency component, the waveform P6 indicated by the dashed-double-dotted line is a second order frequency component, and the waveform P7 indicated by the solid line is a third order frequency component. In FIG. 12, waveforms P4 to P7 are shown raised by 1.0, so that they are made distinguishable.

[0120]

As is obvious when comparing FIG. 7 and FIG. 9, the shape of the image is obviously ruined due to the defocus of 0.2  $\mu\text{m}$ . In addition, when comparing FIG. 9 and FIG. 11, it can be seen that the shape of the image is obviously further ruined when the defocus amount increases.

[0121]

In addition, when the light intensity signal P3 is divided into a frequency component as is described above, various signal processing can be easily performed. For example, when focusing on contrast, which is the amplitude ratio of the first order frequency component P5 and the zero order frequency component P4, in other words, the first order/zero order amplitude ratio, the contrast in the case of the best focus position as is shown in FIG. 8, is 0.43. Also, the contrast in the case of defocus by 0.2  $\mu\text{m}$  from the best focus position as is shown in FIG. 10, is 0.24  $\mu\text{m}$ . And, the contrast in the case of defocus by 0.3  $\mu\text{m}$  from the best focus position as is shown in FIG. 12, is 0.047.

[0122]

As can be seen, the contrast, which is the first order/zero order amplitude ratio, changes sensitively depending on the focus position; therefore, it is convenient to set the best focus position from the intensity signal. That is, it is possible to detect the best focus position, by obtaining the focus position where the contrast being the first order/zero order amplitude ratio is at a maximum.

[0123]

Thus, in this embodiment, the best focus position of the projection optical system PL is detected in the following manner.

[0124]

On detecting the best focus position, L/S marks with a duty ratio of 50% on the that has a line width of 0.2  $\mu\text{m}$  on the wafer (1  $\mu\text{m}$  on reticle) arranged within the measurement article (for convenience, refer to reticle R') are used as the measurement

pattern PM. The detection of the best focus position, is to be performed under the same conditions as the simulation described above.

[0125]

First of all, the reticle loader (not shown in figures) loads the reticle R' onto the reticle stage RST. The main controller 20 then moves the reticle stage RST so as to make the measurement pattern PM on the reticle R' almost coincide with the optical axis of the projection optical system PL.

[0126]

Next, the main controller 20 controls and drives the movable reticle blind 12 such that the illumination light IL is irradiated only on a measurement pattern PM portion. In this state, the main controller 20 irradiates the illumination light IL onto the reticle R', and as is described earlier, the aerial image measurement of the measurement pattern PM is performed similarly as above, based on the slit-scan method using the aerial image measurement unit 59 while scanning the wafer stage WST in the X-axis direction. The main controller 20 repeats the aerial image measurement a plurality of times, while changing the Z-axis position of the slit plate 90 (that is, the Z position of the wafer stage WST) in predetermined steps, and stores the light intensity signal (photoelectric conversion signal) each time in memory.

[0127]

Then, the main controller 20 calculates the contrast, which is the amplitude ratio of the first order frequency component and the zero order frequency component of the plurality of light intensity signals that are respectively Fourier transformed, based respectively on the plurality of light intensity signals (photoelectric conversion signals) obtained by the repeated measurements. And, the main controller 20 detects the Z position of the wafer stage WST (that is, the position of the slit plate 90 in the Z-axis direction) that corresponds to the light intensity signal where the contrast becomes maximum, and sets the position (focus amount) as the best focus position of the projection optical system PL. As is previously described, since the contrast changes sensitively according to the focus position, the best focus position of the projection optical system PL can be accurately and easily measured (set).

[0128]

The amplitude of the frequency component of a high order, in the second order and above, is small in general, therefore, there are some cases when the amplitude with respect to electrical noise and optical noise cannot be sufficiently detected. If there is no problem in the S/N (signal/noise) ratio, however, the best focus position can be obtained also by observing the amplitude ratio of the frequency component of the high order. The L/S mark, which is the measurement mark pattern, is preferably a pattern with an equal line and space width having a duty ratio of 50%, but it is possible to use other marks that have a duty ratio other than 50%. According to the

information obtained by the inventor from the results of experiments and the like, it has become clear that preferable results can be obtained when the arrangement period of the line pattern of the L/S marks, in other words, the mark pitch  $P_M$  is about the level of the following equation (3).

[0129]

$$P_M = \lambda / N.A. \times (1 \sim 1.2) \quad (3)$$

It is not limited to the method using the contrast as described above. The best focus position can be detected by a method detecting the Z position (focus position) where the differential value of the light intensity signal  $P$  ( $m(x)$  in equation (1)) is maximum.

[0130]

In addition, the detection of the image plane shape of the projection optical system PL can be performed in the following manner.

[0131]

In addition, in the case of detecting the image plane shape using a reticle, a measurement reticle R1 on which measurement pattern  $PM_1$  to  $PM_n$  that have the same size and same period as the measurement pattern PM are formed within the pattern area PA is used, as is shown as an example in FIG. 13.

[0132]

Firstly, the reticle R1 is loaded onto the reticle stage RST by the reticle loader (not shown in figures). The main controller 20 then moves the reticle stage RST, so that the measurement pattern  $PM_k$  located at the center of the reticle R1 almost coincides with the optical axis of the projection optical system PL. And, the main controller 20 drives and controls the movable reticle blind 12 so that the illumination light IL is irradiated only on the portion of the measurement pattern  $PM_1$  and sets the illumination area. In this state, the main controller 20 irradiates the illumination light IL on the reticle R1, and likewise with the previous description, aerial image measurement of the measurement pattern  $PM_1$  and detection of the best focus position of the projection optical system PL are performed using the aerial image measurement unit 59 based on the slit-scan method, and the results stored in the internal memory unit.

[0133]

When the detection of the best focus position using the measurement pattern  $PM_1$  is completed, the main controller 20 then drives and controls the movable reticle blind 12 to set the illumination area so that the illumination light IL is irradiated only on the portion of the measurement pattern  $PM_2$ . In this state, similar as above, aerial image measurement of the measurement pattern  $PM_2$  and detection of the best focus position of the projection optical system PL are performed based on the slit-scan method, and the results are stored in the internal memory unit.

[0134]

Subsequently, the main controller 20 repeatedly performs measurement of the aerial image of the measurement patterns  $PM_3$  to  $PM_n$  and detection of the best focus position of the projection optical system PL, while changing the illumination area described above.

[0135]

And, based on each best focus position  $Z_1$ ,  $Z_2$ , . . . , and  $Z_n$ , a predetermined statistical processing as obtained above is performed to calculate the image plane shape of the projection optical system PL.

[0136]

The image plane of the projection optical system PL, that is, the best image forming plane, is a plane consisting of a group of best focus points in innumerable points where the distance from the optical axis is different (that is, innumerable points where the so-called image height differs). Therefore, by the method described above, the image plane shape can be obtained both easily and accurately.

[0137]

Thus, as is described, item A. detecting the best focus position of the projection optical system PL and detecting the best image forming plane (image plane) which was previously referred to can be achieved.

[0138]

Also, spherical aberration measurement of the projection optical system PL can be performed in the following manner.

[0139]

In addition, in the case of detecting the spherical aberration, a measurement reticle R2 is used that has two measurement patterns PM1 and PM2 arranged at a predetermined interval in the Y-axis direction formed around the center in the X-axis direction within the pattern area PA, as shown in FIG. 14. The measurement pattern PM1 is a L/S pattern that has the same size and same period as the first L/S mark of measurement pattern PM referred to earlier. And the measurement pattern PM2 is a L/S pattern of the same size as the measurement pattern PM1 but has a period of a different line pattern (for example, around 1.5-2 times wider than the period (mark pitch) of the measurement mark PM1) arranged in the X-axis direction.

[0140]

To begin with, the reticle R2 is loaded onto the reticle stage RST by the reticle loader (not shown in figures). The main controller 20 then moves the reticle stage RST, so that the measurement pattern PM1 formed on the reticle R2 almost coincides with the optical axis of the projection optical system PL. And, the main controller 20 drives and controls the movable reticle blind 12 so that the illumination light IL is irradiated only on the portion of the measurement pattern PM1 and sets the

illumination area. In this state, the main controller 20 irradiates the illumination light IL on the reticle R2, and likewise with the previous description, aerial image measurement of the measurement pattern PM1 and detection of the best focus position of the projection optical system PL are performed using the aerial image measurement unit 59 based on the slit-scan method, and the results stored in the internal memory unit.

[0141]

When the detection of the best focus position using the measurement pattern PM1 is completed, the main controller 20 then moves the reticle stage RST a predetermined distance in the +Y direction so that the illumination light IL is irradiated on the portion of the measurement pattern PM2. In this state, similar as above, aerial image measurement of the measurement pattern PM2 and detection of the best focus position of the projection optical system PL are performed based on the slit-scan method, and the results are stored in the internal memory unit.

[0142]

Thus, the best focus position  $Z_1$  and  $Z_2$  are obtained in this manner, and based on the difference, the spherical aberration of the projection optical system PL is obtained by calculation.

[0143]

The spherical aberration is one of an aperture aberration of the optical system, and is a phenomenon where in the case beams having various types of apertures from the object point of the optical axis are incident on the optical system the corresponding image point is not formed at one point. Accordingly, the detection of the best focus position in the optical axis of the projection optical system can be repeatedly performed on a plurality of L/S patterns having different pitches, and the spherical aberration can be easily obtained by calculation based on the difference of the best focus position corresponding to each pattern. In this case, it is substantially necessary for the measurement accuracy of the difference of the best focus position to be around  $3\sigma < 20$  nm.

[0144]

#### Detection of the Image Forming Position of the Pattern Image

The respective purposes for detecting the image forming position of the pattern image are as follows: C. measuring the magnification and distortion of the projection optical system, D. measuring the coma aberration of the projection optical system, E. measuring the telecentricity (illumination telecentricity) of the projection optical system.

[0145]

The measurement patterns (the marks subject to measurement) differ depending on the purpose of measurement. Table 2, is a classification according to

each purpose. Since it is preferable for the measurement result of the image forming characteristics of the projection optical system based on aerial image measurement to basically match the measurement result of the image forming characteristics by the exposure method previously described, in Table 2, the aerial image measurement mark (aerial image measurement pattern) is indicated, along with the exposure measurement mark.

[0146]

[TABLE 2]

|  | Exposure Measurement Mark       | Aerial Image Measurement Mark                        |
|--|---------------------------------|--|
| C Projection Lens Magnification + distortion Measurement | Box in Box Mark, Large L/S Mark | Box in Box Mark, Large L/S mark                      |
| D Projection Lens Coma Aberration Measurement            | Line in Box Mark, L/S Mark      | Line in Box Mark, L/S mark, Large and Small L/S Mark |
| E Illumination Telecentricity Measurement                | Box in Box Mark, Large L/S Mark | Box in Box Mark, Large L/S mark                      |

[0147]

Following is a description on the magnification and the distortion measurement of the projection optical system PL. When the magnification and the distortion measurement of the projection optical system PL, for example, as is shown in FIG. 15, a measurement reticle R3 is used. On the reticle R3, measurement pattern BM<sub>1</sub>-BM<sub>5</sub> which is composed of square mark is formed at a total of five points, of 150  $\mu$ m (30  $\mu$ m on the surface of a wafer with a 1/5 magnification) in the center and in the four corners of the pattern area PA. Further, in this case, on the slit plate 90 which constitutes the aerial image measurement unit 59, as shown in FIG. 16, light, passing through any one of the slit 22a of the predetermined width W and length L extending to X-axis direction and the slit 22b of the predetermined width W and length L extending to Y-axis direction, are formed, light passing through any of slits 22a, 22b can be photodetected by the photodetection optical system and light sensor 24 (or light guide portion and photodetection portion of FIG. 3) in the inside of wafer stage WST. Herein, for example, W is 0.3 $\mu$ m and L is 25 $\mu$ m.

[0148]

Firstly, the reticle R3 is loaded onto the reticle stage RST by the reticle loader (not shown in figures). Then, the main controller 20 moves the reticle stage RST so that the center of the measurement pattern BM<sub>1</sub> located in the middle of the reticle R3 almost coincides with the optical axis of the projection optical system PL. Next, the main controller 20 controls and drives the movable reticle blind 12 to set the illumination area, so that the illumination light IL illuminates only a rectangular area portion including the measurement pattern BM<sub>1</sub>, the area being one size larger than

the measurement pattern  $BM_1$ . In this state, the main controller 20 irradiates the illumination light  $IL$  on the reticle  $R3$ . Thus, the aerial image  $BM_1'$  of the measurement pattern  $BM_1$ , that is almost square  $30\mu$  pattern is formed as shown in FIG. 16.

[0149]

In this state, the main controller 20 performs aerial image measurement of the measurement pattern  $PM_1$  using the aerial image measurement unit 59 while wafer stage WST is scanned to X-axis direction, as indicated by arrow A in FIG.16. The light intensity signal  $m(x)$  obtained by the measurement is stored in memory. Then, in the main controller 20, the image forming position of the measurement pattern  $PM_1$  is obtained by known phase detection method, based on the obtained light intensity signal  $m(x)$ . Herein, as the phase detection method, for example the light intensity signal  $m(x)$  is Fourier-transformed to obtain first frequency component (regard as sine wave). The first frequency component is multiplied by sine wave based on the same frequency, for example the sum of a first period is calculated. The first frequency component is multiplied to cosine wave based on the same period as the component, for example the sum of a first period is calculated. There can be used general method such that quotient is obtained by dividing the obtained sum each other, inverse tangent (arc tangent) of the quotient is calculated, and thereby phase difference to reference signal of the first frequency component is obtained, and X-position  $x_1$  of the measurement pattern  $PM_1$  is obtained based on the phase difference.

[0150]

The main controller 20 performs the aerial image measurement of the measurement pattern  $PM_1$  using the aerial image measurement unit 59 while the wafer stage WST is scanned in the Y-axis direction, and the light intensity signal  $m(y)$  obtained by the measurement is stored in a memory. Further, by the phase detection method as described above, Y-position  $y_1$  of the measurement pattern  $PM_1$  is obtained. Then, the main controller 20 corrects the positional deviation of the reticle  $R3$  with respect to the center of the optical axis, based on the coordinate values ( $x_1$ ,  $y_1$ ) of the obtained measurement pattern  $PM_1$ .

[0151]

When correction of the positional deviation of the reticle  $R3$  is completed, the main controller 20 then controls and drives the movable reticle blind 12 to set the illumination area, so that the illumination light  $IL$  illuminates only a rectangular area portion including the measurement pattern  $BM_2$ , the area being one size larger than the measurement pattern  $BM_2$ . In this state, likewise as above, the aerial image measurement and the measurement of the XY position of the measurement pattern  $BM_2$  are performed based on the slit-scan method, and the results are stored in the internal memory unit.

[0152]

Hereinafter, similarly as above, the main controller 20 repeatedly performs the aerial image measurement and the measurement of the XY position of the measurement patterns BM<sub>3</sub>-BM<sub>5</sub>, while changing the illumination area described above.

[0153]

And, based on the coordinate values (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>), (x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>), (x<sub>4</sub>, y<sub>4</sub>), and (x<sub>5</sub>, y<sub>5</sub>) of the measurement mark patterns BM<sub>2</sub> to BM<sub>5</sub> obtained from the measurements, a predetermined calculation is performed to obtain at least either the magnification or the distortion of the projection optical system PL.

[0154]

Distortion refers to an aberration of the projection optical system PL where an image of a line originally straight turns out to be a distorted image, and due to this distortion, the mark image formed on the image plane is shifted (laterally) from the predetermined position, similar to the case when there is a magnification error.

[0155]

Accordingly, by the measurement method of magnification and distortion described above, the positional shift of the aerial image of each measurement pattern projected at different positions within the image field of the projection optical system PL can be respectively obtained with good accuracy using the phase detection method. As a consequence, at least either the distortion or the magnification can be measured with good accuracy.

[0156]

There are cases, however, when a sufficient measurement accuracy cannot be obtained when slit-scanning a single 30 square  $\mu\text{m}$  pattern image BM<sub>n</sub>' (n=1, 2, ..., 5) since the image only has two edges. In such a case, the measurement pattern (for convenience, "CM<sub>1</sub> to CM<sub>5</sub>") is composed of an L/S pattern large enough so that it is hardly affected by the coma aberration, for example L/S pattern having a line width of 5  $\mu\text{m}$  or over (the aerial image will be an L/S pattern image having a line width of 1  $\mu\text{m}$ ). The measurement pattern may use the formed reticle, instead of the measurement pattern BM<sub>1</sub> to BM<sub>5</sub>. In FIG. 17, when the aerial image measurement is performed using these reticles, there represents the state where the aerial image CM<sub>n</sub>' (n=1, 2, ..., 5) of the measurement patterns CM<sub>1</sub> to CM<sub>5</sub> is formed on the slit plate 90.

[0157]

In the description above, the positional shift of the aerial image of the measurement pattern is measured by the phase detection method. The present invention is not limited to this, however, and aerial image measurement based on the slit-scan method can be repeatedly performed on the aerial image of the measurement

pattern (BMn or CMn) projected at different positions within the image field of the projection optical system PL. And, based on the intersection point of each of a plurality of light intensity signals  $m(x)$  (photoelectric conversion signals) obtained by the measurements and a predetermined slice level, the position of the aerial image (BMn' or CMn') (edge position) corresponding to each photoelectric conversion signal can be respectively calculated. And, at least either the distortion or the magnification of the projection optical system PL may be obtained, based on the calculation results. In such a case, according to the edge detection method using the slice method, the position of the aerial image (BMn' or CMn') projected at different positions within the image field of the projection optical system PL can respectively be obtained with good accuracy, and as a result, at least either the distortion or the magnification can be measured with good accuracy. In this case, when each light intensity signal is processed in binary at the predetermined slice level and the slice level is set appropriately, for example, as can be surmised from the relation between the waveform P2 and P3 in FIG. 7, this state becomes equivalent to measuring the edge position of the resist image that can be actually obtained by exposure.

[0158]

With the current exposure apparatus, distortion (including magnification) control of the projection optical system is performed in the following manner, using a reference wafer. Reference wafer, here, refers to a wafer, on which an outer BOX mark of 30 square  $\mu\text{m}$  is transferred within the exposure area by the projection optical system, developed, and etched, and after the etching process the position of the edge of the outer BOX mark is measured in advance with equipments such as the optical interferometric coordinate measurement unit. And, when distortion of the exposure apparatus is measured, a resist image of a 10 square  $\mu\text{m}$  inner BOX mark is exposed in the center of the outer BOX mark of 30 square  $\mu\text{m}$  made in the etching process, and the positional relation between the two marks is measured with the registration measurement unit and the like.

[0159]

Accordingly, if distortion measurement is performed, by detecting the aerial image of the 10 square  $\mu\text{m}$  BOX mark on the wafer (on the image plane) with the edge detection method, the influence of the coma aberration becomes similar to when distortion measurement is performed as above using the reference wafer. Therefore, a relative difference does not occur. This allows distortion to be measured from the aerial image, with the accuracy equivalent to distortion measurement described above using the reference wafer.

[0160]

To achieve this measurement, consideration can be made of forming an inner BOX mark of 50 square  $\mu\text{m}$  (10 square  $\mu\text{m}$  on the wafer) on the device reticle or the

reticle mark plate referred to earlier. However, the mark of 10 square  $\mu\text{m}$  cannot be formed on the wafer because of dishing occurring in the recent CMP process.

[0161]

Therefore, after diligent study, the inventor reached a conclusion that the aerial image measurement is to be performed using a BOX mark of 10 square  $\mu\text{m}$  on the wafer subdivided into strips in the non-measurement direction (the length not necessarily being 10  $\mu\text{m}$ ) (the mark hereinafter referred to appropriately as an "artificial BOX mark"). The reason for this, is because the artificial BOX mark is a type of the so-called L/S pattern, and if aerial image measurement is performed based on the slit-scan method by scanning the aerial image measurement unit in the direction perpendicular to the periodic direction, the signal waveform that can be obtained turns out to be similar to the signal waveform obtained from the aerial image of the BOX mark.

[0162]

The inventor performed distortion measurement of the projection optical system PL by the edge detection method in the procedure previously described, using a measurement reticle R3' on which an artificial BOX pattern subdivided in strips in regard to the X direction is formed, instead of using the measurement patterns BM<sub>1</sub>-BM<sub>5</sub> of the measurement reticle R3 shown in FIG. 15. As a consequence, it was confirmed that the Y position of each measurement pattern was the same as the Y position of the measurement pattern BM<sub>n</sub>. According to this confirmation, distortion measurement can be performed by preparing a measurement reticle on which an artificial BOX pattern subdivided in strips in regard to the Y direction and an artificial BOX pattern subdivided in strips in regard to the X direction are formed, and by relatively scanning the respective measurement pattern with the slit 22a and 22b.

[0163]

FIG. 18 shows an example of a mark block (300 square  $\mu\text{m}$ ) on which the artificial BOX mark pattern subdivided in strips in regard to the Y direction, the artificial BOX mark pattern subdivided in strips in regard to the X direction described above, and other measurement patterns are formed. In FIG. 18, the marks MM1 and MM2 are, for example, magnification measurement patterns made up of five 5  $\mu\text{m}$  L/S marks, the marks MM3 and MM4 are, for example, focus measurement patterns made up of twenty-nine 1  $\mu\text{m}$  L/S marks, and the marks MM5 and MM6 are, for example, artificial-BOX patterns made up of eleven 2.5  $\mu\text{m}$  L/S marks. This mark block, in FIG. 18, is formed, for example, on the device reticle or the reticle fiducial mark plate. Incidentally, on subdivision of the artificial-BOX mark, it is preferable for the L/S mark to be around 2.5  $\mu\text{m}$  or below (the L/S to be around 0.5  $\mu\text{m}$  or below on the wafer).

[0164]

Next, the measurement method of the coma aberration of the projection optical system will be described. The following two methods are typical in the measurement of the coma aberration, the first method of using the L/S mark as the measurement mark pattern, and the second method of using the Line in Box mark as the measurement mark pattern.

[0165]

#### The First Method

In the case of measuring the coma aberration by exposure, the method using the line width abnormal value of the small L/S mark image around the limit of resolution is known. The line width abnormal value, here, is a value serving as an indicator to indicate the asymmetrical degree of the resist image formed by exposure. For example, in the case of a resist image of a 0.2  $\mu\text{m}$  L/S mark (design value) as is shown in FIG. 19, the line width abnormal value A can be defined as in the following equation (4), using the line widths L1 and L5 of line pattern on both edges.

[0166]

[Formula 3]

$$A = \frac{L1 - L5}{L1 + L5} \quad \dots(4)$$

[0167]

The desirable performance of the projection optical system (the projection lens) is for the value A to normally be less than 3%.

[0168]

The line width abnormal value of the L/S pattern image can also be directly measured on aerial image measurement. In this case, the edge detection method by the slice method may be used, however, on setting the slice level, a simple resist image simulation of processing the light intensity signal corresponding to the aerial image in binary at an appropriate threshold value (threshold level) to make the processed light intensity signal become closer to the line width of the resist image is preferably performed. Accordingly, it is desirable to set the threshold value as the slice level.

[0169]

The measurement method of the coma aberration by the line width abnormal value is explained in the following description. When measuring the coma, for example, as is shown in FIG. 20, a measurement reticle R4 is used. On the reticle R4, measurement mark patterns DM<sub>1</sub>-DM<sub>5</sub> are formed at a total of five points, in the center and in the four corners of the pattern area PA. As the measurement mark patterns DM<sub>1</sub>-DM<sub>5</sub>, an L/S pattern having a line width of 1  $\mu\text{m}$  (0.2  $\mu\text{m}$  on the wafer surface) with a 50% duty ratio and a periodicity in the X-axis direction, is used.

Further, in this case, the slit plate 90 which constitutes the aerial image measurement unit 59 and the aerial image measurement unit 59, or the like are constituted in the same manner as measurement for magnification and distortion described above.

[0170]

In this case, in the procedure same as the magnification and distortion measurement previously described, the main controller 20 performs reticle alignment and aerial image measurement and obtains the light intensity signal  $m(x)$ , which corresponds to the aerial image  $(DM_2'-DM_5')$  of the measurement patterns  $DM_2-DM_5$ .

[0171]

And the intersection points of each light intensity signal  $m(x)$  obtained and a predetermined slice level are respectively obtained, and from the X coordinate of the intersection points obtained, the line width of each line of the respective aerial images  $DM_2'-DM_5'$  is obtained, and based on the line width the line width abnormal values are respectively calculated, based on equation (4). And, the coma aberration of the projection optical system PL is obtained based on the calculation result.

[0172]

The coma aberration, is an aberration of the lens due to different magnifications in various zones of the lens, and occurs at portions far from the main axis within the image field of the projection optical system PL. Accordingly, at a position far from the optical axis, the line width of each line pattern becomes different depending on the coma aberration in the aerial image of the L/S pattern. Therefore, with the method described above by using the slice method and detecting the line width abnormal value of each line pattern with the edge detection method, it becomes possible to measure the coma aberration with high accuracy, in a simple manner.

[0173]

In the case each measurement pattern  $DM_1-DM_5$ , for example, is a single L/S pattern including five line patterns, and the measurement accuracy of the line width abnormal value is not sufficient enough, a combined mark pattern that has an arrangement of a plurality of L/S patterns with five lines combined in a predetermined period may be used as the measurement pattern. In FIG. 21 when these composite mark pattern is used as the measurement pattern (refer to EM), it is represent that the aerial image  $EM'$  of the measurement pattern EM on the slit plate 90 is formed.

[0174]

As is shown in FIG. 22, the aerial image  $EM'$  has two fundamental frequency components. That is, for example, a frequency component (a first fundamental frequency component)  $f_1$  that corresponds to the pitch of each line pattern of the photoelectric conversion signal and has a  $0.4 \mu m$  pitch, and a frequency component  $f_2$  that corresponds to the repetition period of each L/S pattern (the arrangement pitch of a mark group, which consists of five lines), such as a pitch of  $3.6 \mu m$ , in other words,

a second fundamental frequency component corresponding to the entire width of each L/S pattern.

[0175]

Accordingly, the main controller 20 may perform reticle alignment and aerial image measurement in the procedure same as the magnification and distortion measurement previously described. And, when the light intensity signal  $m(x)$  corresponding to the aerial image  $EM_2'-EM_5'$  of the measurement pattern  $EM_2-EM_5$  is obtained, the main controller 20 may calculate the phase difference between the first fundamental frequency component described above and the second fundamental frequency component of each light intensity signal based on the phase detection method, and based on the calculation results may obtain the coma aberration of the projection optical system PL.

[0176]

When the width of the pattern subject to aerial image measurement in the scanning direction is narrower, the influence of the coma aberration is more apparent. Therefore, the influence of coma aberration on the aerial image of each line pattern of the L/S line pattern is different from the influence of coma aberration on the aerial image of a pattern when the entire L/S pattern is regarded as a single pattern. Accordingly, the phase difference of the first fundamental frequency component corresponding to the pitch of each line pattern of the photoelectric conversion signals and the second fundamental frequency component corresponding to the entire width of the L/S pattern can be calculated. And, based on the calculation result, according to the method described above of obtaining the coma aberration of the projection optical system, the coma aberration of the projection optical system PL can be obtained with high accuracy with the phase detection method. In this case, it is preferable to set the ratio of the arrangement pitch of the mark (0.4  $\mu m$  in the example above) and the arrangement pitch of the mark group consisting of five lines mark (3.6  $\mu m$  in the example above) multiplied in integer, from the signal processing point of view.

[0177]

#### The Second Method

The second method of measuring the coma aberration will be described next. In this method, as shown in FIG. 23A, a measurement reticle R5 is used. On the reticle R5, measurement patterns  $FM_1-FM_5$  are formed at a total of five points, in the center and in the four corners of the pattern area PA. As the measurement patterns  $FM_n(n=1,2,\dots,5)$ , mark pattern referred to as "Line in Box Mark" is used which is shown by magnification in FIG. 23B. As shown in FIG. 23B, the mark pattern is a mark of a square-shaped pattern with a side length  $D1$  (for example,  $D1=150 \mu m$ ), which has a square-shaped space pattern (width  $D3$ ) that is concentric with the square-

shaped pattern and with a side length D2 (for example, D2=100  $\mu\text{m}$ ) formed in the interior. When the measurement pattern FM<sub>n</sub> is exposed on the wafer and is developed, a narrow groove of 20 square  $\mu\text{m}$  is formed at the same time in the center of a resist mark of 30 square  $\mu\text{m}$ . The width of the narrow groove is preferably around  $(\lambda/\text{N.A.})/2$  or below, therefore, D<sub>3</sub> is preferably around 4 times or below. For example, D<sub>3</sub> may be 0.5  $\mu\text{m}$ .

[0178]

When the image of the mark measurement pattern FM<sub>n</sub> is formed with a projection optical system having a coma aberration, since the lateral shift of the narrow line is greater than the wide line, the narrow groove turns out to be eccentric and loses its symmetry. Accordingly, by measuring the eccentric amount of the narrow groove, in other words, the degree of the symmetry lost, the influence of the coma aberration can be acknowledged.

[0179]

Further, in this case, the slit plate 90 which constitutes the aerial image measurement unit 59 and the aerial image measurement unit 59 are constituted in the same manner as magnification and distortion measurement described above.

[0180]

In this case, in the procedure same as the magnification and distortion measurement previously described, the main controller 20 performs reticle alignment and aerial image measurement and obtains the light intensity signal m(x), which corresponds to the aerial image (refer to FM<sub>2</sub>'-FM<sub>5</sub>') of the measurement patterns FM<sub>2</sub>-FM<sub>5</sub>.

[0181]

And based on the intersection point of each light intensity signal and the predetermined slice level, the symmetric shift of the aerial image FM<sub>2</sub>'-FM<sub>5</sub>' of measurement pattern is calculated, and the coma aberration of the projection optical system PL is obtained based on the calculation results.

[0182]

In this manner, with the edge detection method using the slice method, the symmetric shift of the aerial image of the measurement pattern FM<sub>2</sub>-FM<sub>5</sub> can be calculated, and with the method described above of obtaining the coma aberration of the projection optical system PL based on the calculation results, the coma aberration of the projection optical system PL can be obtained with high accuracy.

[0183]

In the case described above, the situation may occur where the slit in the non-measurement direction interferes with the aerial image, due to the arrangement of the slit 22a and 22b on the slit plate 90. In such a case, instead of using the measurement mark FM<sub>n</sub> as above, a linear mark pattern laterally symmetric that has, for example, a

wide line pattern with a line width of 50  $\mu\text{m}$  and a narrow line pattern with a line width of 0.5-0.75  $\mu\text{m}$  arranged at a predetermined interval (for example, 50  $\mu\text{m}$ ) in the measurement direction, and may be used as the measurement pattern.

[0184]

FIG. 24 shows the state of an aerial image  $\text{GMn}'$  of such a measurement pattern (refer to  $\text{GMn}$ ) formed on the slit plate 90. In FIG. 24,  $D_4$  is 10  $\mu\text{m}$ , and  $D_5$  is 0.1-0.15  $\mu\text{m}$ . The coma aberration of the projection optical system  $\text{PL}$  may be detected, by detecting the light intensity signal corresponding to such an aerial image  $\text{GMn}'$  with the edge detection method using the slice method.

[0185]

The positional shift due to the effect of the coma aberration is greater in the aerial image of a line pattern having narrow width in the scanning direction (measurement direction). As a consequence, the symmetry of the aerial image of a symmetric mark pattern having various types of line patterns with different line widths arranged at a predetermined interval in the direction corresponding to the scanning direction, such as the measurement pattern ( $\text{GMn}$ ), is greatly deformed, when the coma aberration becomes large.

[0186]

Thus, according to the method of detecting the symmetric shift of the aerial image  $\text{GMn}'$  described above, the coma of the projection optical system  $\text{PL}$  can be detected with high accuracy.

[0187]

In this case, also, as a matter of course, in order to improve the measurement reproduction, the aerial image  $\text{HM}'$  of the measurement pattern repeatedly arranged as in FIG. 25, may be detected.

[0188]

Next, the method of measuring the illumination telecentricity will be described.

[0189]

The illumination telecentricity is set, by measuring the changing amount of the image position that changes due to defocus. As the measurement pattern, a large mark pattern that is not affected by the coma aberration is used, likewise with the magnification and distortion measurement. In the case of the exposure method, a Box in Box Mark or a large L/S mark is used, and exposure is respectively performed at three points; the best focus position, the defocus position of around +1  $\mu\text{m}$ , and the defocus position of around -1  $\mu\text{m}$ . Then, the relation between the image position and the focus position is measured, and the illumination telecentricity (=lateral shift amount of the image/defocus amount)) is calculated.

[0190]

In the case of aerial image measurement, a large mark that is not affected by the coma aberration is used, similar to the case of the exposure method, and the absolute position of the aerial image is measured at each focus position. Thus, the illumination telecentricity is calculated.

[0191]

As is described in detail so far, with the exposure apparatus 100 related to the first embodiment, the exposure apparatus 100 includes an aerial image measurement unit 59 that has a slit plate 90 which slit width is,  $2D=n \cdot (\lambda/N.A.)$ ,  $n \leq 0.8$ . Therefore, by performing aerial image measurement of the measurement pattern arranged on the reticle or the reticle fiducial mark plate using this aerial image measurement unit, aerial image measurement with high precision becomes possible where the image profile hardly deteriorates when converting the aerial image to the aerial image intensity signal. In this case, the signal processing system arranged downstream of the optical sensor 24 (photoconversion element) will not require a large dynamic range.

[0192]

In addition, with the exposure apparatus 100, the main controller 20 can perform aerial image measurement based on the slit-scan method using the aerial image measurement unit 59, and by using the measurement results, measurement of various image forming properties of the projection optical system PL described earlier can be performed with high precision. Therefore, for example, at the startup operation of the exposure apparatus in the factory, adjustment of the optical properties of the projection optical system PL may be performed with high accuracy based on the measurement results of image forming performance. Alternatively, With reference to distortion or magnification, the measurement is carried out periodically, and projection optical system PL based on the measurement result can correct distortion or magnification (in particular, non-scanning direction in scanning and exposure), using a correction unit (for example, Z/tilt driving unit of specific lenses elements constituting projection optical system, or adjusting internal pressure of airtight room provided between specific lenses element constituting projection optical system) of image forming property not shown. Further, the magnification in scanning direction in scanning and exposure is corrected by adjusting the scanning rate of at least reticle and wafer in scanning and exposure for example.

[0193]

As is described, with the exposure apparatus 100, for example, due to the initial adjustment of the image forming properties of the projection optical system or adjustment of the image forming properties of the projection optical system prior to starting exposure, exposure is performed using a projection optical system PL which

image forming properties are adjusted to high precision. As a consequence, the exposure accuracy can be improved.

[0194]

In addition, with the exposure apparatus 100, the main controller 20 detects the baseline amount of the alignment microscope ALG1 serving as a mark detection system with high accuracy using the aerial image measurement unit 59. Thus, by using the baseline amount and controlling the position of the wafer W during exposure or the like, it becomes possible to improve the overlay accuracy of the reticle and the wafer. From this viewpoint as well, exposure accuracy can be improved.

[0195]

In the embodiment above, the case has been described where the slit width 2D is set in consideration of both the wavelength  $\lambda$  of the illumination light and the numerical aperture N.A. of the projection optical system PL, however, the present invention is not limited to this.

[0196]

That is, the slit width 2D may be set in consideration of only the wavelength  $\lambda$  or the numerical aperture N.A. Even in the case of using an aerial image measurement unit comprising a slit plate having a slit such as this slit width 2D, likewise with the embodiment above, measurement of the aerial image (image intensity distribution) of a predetermined pattern based on the slit-scan method is possible with high precision.

[0197]

Next, the setting of the slit width (2D) will be further described. As an example, a suitable setting method of the slit width will be described, referring to the case of focus measurement.

[0198]

As is previously described, the measurement of the best focus position of the projection optical system is obtained, by repeating the aerial image measurement of the measurement pattern a plurality of times while changing the position of the slit plate 90 in the Z-axis direction (optical axis direction) based on the slit-scan method, and detecting the Z position (the Z coordinate of the contrast peak) of the slit plate 90 where the contrast being the amplitude ratio of the light intensity signal (first order/zero order) obtained by the aerial image measurement is at a maximum.

[0199]

Usually, when the best focus is detected, the slit plate 90 is changed at a pitch interval of  $0.15\mu\text{m}$  in approximately 15 stages (steps).

[0200]

An example of best focus detection referred to above will now be described, using FIG. 26. FIG. 26 shows the measurement values of the contrast (the mark x in FIG. 26) obtained at 13 points, when the slit plate 90 is changed in the Z-axis direction in 13 stages (steps), with the horizontal axis as the Z-axis. Based on the contrast measurement values at the 13 points indicated with the mark x in FIG. 26, the approximation curve C of around the fourth order is obtained by the least squares method. The intersection points of the approximation curve C and an appropriate threshold value (threshold level) SL is obtained, and the midpoint of the distance between the intersection points =2B, is set as the Z coordinate value corresponding to the best focus.

[0201]

FIG. 27 shows a line graph similar to FIG. 26. In FIG. 27, however, the vertical axis indicates the amplitude (or the first order, which will be described later) of the first order frequency component. The focus detection accuracy will now be considered, when the range of WZ (=step pitch x the number of data) in FIG. 27 is fixed.

[0202]

(1) In the case that shot noise is dominant, when the amplitude of the first component is expressed as S, the shot noise is proportional to  $S^{1/2}$ . The average tilt of the curve related to the amplitude of the first frequency component Z (simply refer to the first component) is inversely proportional to the depth of focus (DOF), therefore, when the noise of the amplitude of the respective first components that randomly fluctuates the data in the Z direction is expressed as noise N, then the relationship can be indicated as follows,

$$N \propto S^{1/2} \cdot \text{DOF} \propto \lambda \cdot S^{1/2} / (\text{N.A.})^2 \quad (5)$$

In this case, N.A. is the numerical aperture of projection optical system.

[0203]

So, when the line width of the subject pattern is set as P, since  $P \propto \lambda / \text{N.A.}$ , the relation in the following equation (6) is valid.

$$S / N \propto (\text{N.A.})^2 \cdot S^{1/2} / \lambda \propto \lambda \cdot S^{1/2} / P \quad (6)$$

S/N, in this case, is the S/N ratio, which is the ratio of the amplitude of the first component and the noise amplitude.

[0204]

(2) In the case that dark noise is dominant, dark noise is not dependent on the amplitude S of the first component. The average tilt of the curve related to the amplitude of the first component Z is inversely proportional to the depth of focus (DOF), therefore, when the noise of the amplitude of the respective first components that randomly fluctuates the data in the Z direction is expressed as noise N, then the relationship can be indicated as follows.

$$N \propto DOF \propto \lambda / (N.A.)^2 \quad (7)$$

[0205]

Accordingly, when the line width of the subject pattern is set as P, the relation in the following equation (8) is valid.

$$S / N \propto (NA)^2 \cdot S / \lambda \propto \lambda \cdot S / P \quad (8)$$

[0206]

When the slit width (2D) is optimized with the equations (6) and (8), if the wavelength and the pitch of the subject pattern are set, attention is required only on the amplitude S of the first component, and it is obvious that the S/N ratio is proportional to the 0.5th-1st power of the first order amplitude S, depending on the noise properties.

[0207]

In FIGS. 28A to 31B, simulation results to obtain a suitable range of the slit width (2D) are exemplified. Of these figures, FIG. 28A, FIG. 29A, FIG. 30A, and FIG. 31A are results under the condition of N.A.=0.68,  $\lambda=248$  nm, and  $\sigma=0.85$ . Whereas, FIG. 28B, FIG. 29B, FIG. 30B, and FIG. 31B are results under the condition of N.A.=0.85,  $\lambda=193$  nm, and  $\sigma=0.85$ .

[0208]

FIG. 28A and FIG. 28B show the S/N ratio related to focus detection, in the case of applying the equation (6) when assuming an example of using a photo multiplier. In FIG. 28A, the solid line (●), the broken line (□), and the dotted line (△) respectively indicate the case when the L/S pattern is used having the line width L respectively of 200 nm, 220 nm, and 250 nm, and the duty ratio of 50% in all cases, as the measurement mark. And, in FIG. 28B, the solid line (●), the broken line (□), and the dotted line (△) respectively indicate the case when the L/S pattern is used as the measurement mark, that have the line width L respectively of 120 nm, 130 nm, and 140 nm, and the duty ratio of 50% in all cases.

[0209]

FIG. 29A and FIG. 29B indicate the contrast that respectively correspond to FIG. 28A and FIG. 28B. The contrast becomes larger, when the slit width becomes smaller. Since the amplitude of zero order is proportional to the slit width, the first order (1st Order) is the result of the contrast taken to the slit width ratio power, with 0.3  $\mu$ m as a reference of the slit width ratio. The first order is proportional to the amplitude of the first component.

[0210]

FIG. 30A and FIG. 30B indicate the first order that respectively correspond to FIG. 28A and FIG. 28B.

[0211]

From FIG. 28A and FIG. 28B, consequently, it is obvious that in all wavelengths and line widths, the optimum slit width (2D) for focus detection is the length the same as half the pattern pitch (=2L). As for the pitch, the smaller the better, however, as a matter of course, it essentially has to be within the limit of resolution. Accordingly, the optimum value of the slit width is to be about half the limit of resolution pitch of the exposure apparatus.

[0212]

FIG. 31A and FIG. 31B indicate the S/N ratio related to focus detection when applying the equation (8) under the same conditions as FIG. 28A and FIG. 28B.

[0213]

Optimization of the slit width 2D will now be described, from a different point of view.

[0214]

When the slit width of the aerial image measurement unit is expressed as 2D and the intensity distribution of the aerial image  $i(x)$ , then the slit transmittance intensity  $m(x)$  can be expressed as in the following equation (9) by generalizing the equation (1) previously described.

[0215]

[Formula 4]

$$m(x) = \int_{x-D}^{x+D} i(t) dt \quad \dots(9)$$

[0216]

The focus detection is calculated from the zero order and first order ratio (contrast) of the intensity image of the L/S in the limit of resolution. When the intensity of the zero order component included in the intensity image of the aerial image is expressed as  $a$ , and the intensity of the first order component  $b \cdot \sin(\omega_1 \cdot x)$ , the slit transmittance light intensity  $m_0(x)$ ,  $m_1(x)$  observed can be expressed as in the following equations (10) and (11).  $\omega_1$ , in this case, is the spatial frequency in the limit of resolution.

[0217]

[Formula 5]

$$m_0(x) = a \int_{x-D}^{x+D} dt = 2aD \quad \dots(10)$$

[0218]

[Formula 6]

$$m_1(x) = b \int_{x-D}^{x+D} \sin(\omega_1 t) dt = \frac{2b}{\omega_1} \sin(\omega_1 x) \cdot \sin(\omega_1 D) \quad \dots(11)$$

[0219]

From equation (10), it can be seen that the zero order component is simply proportional to the slit width, and as for equation (11), the first order component becomes maximum when it satisfies the conditions of the following equation (12).

[0220]

$$\omega_1 D = \pi/2 \cdot (2n-1) \quad (12)$$

(provided that  $n=1, 2, 3, \dots$ )

[0221]

When equation (12) is satisfied, in the case  $D=\pi/(2\omega_1)$  is multiplied by odd numbers, the gain of the first order component becomes maximum (the contrast becomes maximum). Therefore, when the slit width  $2D$  is  $\pi/\omega_1$  multiplied by an odd number, that is, the slit width  $2D$  is preferably half the minimum mark pitch (hereinafter referred to as "minimum half-pitch" as appropriate) multiplied by an odd number.

[0222]

In addition, the setting of the dynamic range of the electric system becomes easier when the first order component gain is high and the zero order component gain is low. So, ultimately, in the case of  $n=1$  in equation (12), that is, when the slit width  $2D$  is  $\pi/\omega_1$ , in other words, when slit width  $2D$  coincides with the minimum half-pitch, the slit width  $2D$  is at the optimum.

[0223]

FIG. 32A and FIG. 32B respectively indicate the simulation data when the slit width  $2D$  is of equal magnification and is of three times the minimum half-pitch. In these drawings, the solid line curve LL1 shows the intensity signal of the light transmitting the slit, the dashed-dotted line LL2 shows the differential signal of the light, and the broken line LL3 shows the aerial image strength. In these drawings, the horizontal axis shows the slit position, and the vertical axis shows the signal intensity.

[0224]

FIG. 33A and FIG. 33B respectively indicate the simulation data when the slit width  $2D$  is five times and is seven times the minimum half-pitch. In these drawings, the solid line curve LL1 shows the intensity signal of the light transmitting the slit, the dashed-dotted line LL2 shows the differential signal of the light, and the broken line LL3 shows the aerial image strength. In these drawings, the horizontal axis shows the slit position, and the vertical axis shows the signal intensity.

[0225]

From FIG. 32A and FIG. 32B, and from FIG. 33A and FIG. 33B, it can be seen that the amplitude of the differential signal LL1 is the same. However, when the  $n$ , in the equation slit width  $2D=\text{minimum half-pitch} \times n$ , increases by 1, 3, 5, and 7, the signal processing system (the processing system arranged further downstream of

the optical sensor) obviously requires a greater dynamic range. This shows, that the slit width 2D is at the optimum when the slit width 2D coincides with the minimum half-pitch.

[0226]

In addition, when the Fourier Transform is performed on equations (1) and (2), the frequency characteristic of the averaging effect by the slit is ascertained.

[0227]

[Formula 7]

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \exp(-2\pi ux) dx = 2D \frac{\sin(2\pi uD)}{2\pi uD} = 2D \frac{\sin(\omega D)}{\omega D} \quad \dots(13)$$

[0228]

FIG. 34 shows the frequency characteristics when the slit width 2D is equal, three times, and five times the half-pitch of the limit of resolution, with  $\omega_1$  being the spatial frequency in the limit of resolution. In FIG. 34, the reference marks GF5, GF3, and GF1 respectively show the frequency characteristic line graph when the slit width is five times, three times, or equal to the minimum half-pitch. As is obvious from FIG. 34, from the aspect of stability in the gain, the slit width is at the optimum in the case the slit width coincides with the minimum half-pitch (GF1).

[0229]

#### The Second Embodiment

Next, the second embodiment related to the present invention will be described, based on FIG. 35 and FIG. 36. Structures and components that are identical or equivalent to the exposure apparatus 100 related to the first embodiment previously described, are designated with the same reference numerals, and the description thereabout is briefly made or is entirely omitted.

[0230]

FIG. 35 shows the arrangement of an exposure apparatus related to the second embodiment, with a part of the arrangement omitted. The exposure apparatus 110 differs from the exposure apparatus 100 only on the point that the arrangement of the alignment optical system ALG2 serving as a mark detection system is different. Therefore, hereinafter, this difference will be mainly focused in this description.

[0231]

As is shown in FIG. 35, the alignment optical system ALG2 is a laser scanning alignment sensor based on the off-axis method, arranged on the side surface of the projection optical system PL.

[0232]

The alignment system ALG2, as is shown in FIG. 35, is structured including: an alignment light source 132; a half mirror 134; a first objective lens 136; a second

objective lens 138; a silicon photodiode (SPD) 140, and the like. In this case, as the light source 132, a helium-neon laser is used. With the alignment microscope ALG2, as is shown in FIG. 35, the laser beam emitted from the light source 132 forms a laser beam spot to illuminate the alignment mark M<sub>w</sub> on the wafer W via the half mirror 134 and the first object lens 136. The laser beam is normally fixed, and by scanning the wafer stage WST, the laser beam and the alignment mark M<sub>w</sub> are relatively scanned.

[0233]

The scattered light generated from the alignment mark M<sub>w</sub> is concentrated and photo-detected on the silicon photodiode SPD 140 via the first objective lens 136, the half mirror 134, and the second objective lens 138. A zero order optical filter is inserted in the alignment microscope ALG2 to create a darkfield, and the scattered light is detected only at the position where the alignment mark M<sub>w</sub> is located. The light photo-detected by the SPD 140 is transformed into photoelectric conversion signals, which are sent to the main controller 20 from the SPD 140. In main controller 20, based on the photoelectric conversion signals and the positional information of the wafer stage WST upon detection, which is the output of the wafer interferometer 31, the coordinate position of the alignment mark M<sub>w</sub> is calculated, in the stage coordinate system that is set by the optical axes of the interferometer.

[0234]

The baseline stability of such a stage scan type laser scanning alignment sensor is set by the stability of the beam position of the laser, the stability of interferometer, and the stability of the gain in the SPD-electric system.

[0235]

The baseline measurement of the alignment microscope ALG2 will now be described. As a premise, the reticle R is to be mounted on the reticle stage RST.

[0236]

First of all, likewise as is previously described, the main controller 20 measures the projected image of the reticle alignment mark PM formed on the reticle R using the aerial image measurement unit 59, and obtains the projection position of the reticle pattern image. That is, the reticle alignment is performed.

[0237]

Next, the main controller 20 moves the wafer stage WST, and as is shown in FIG. 36, scans the slit 22 of the aerial image measurement unit 59 with respect to the laser beam spot, simultaneously takes in the light intensity signal of the laser beam passing through the slit and the measurement values of the wafer interferometer 31, obtains the profile of the laser beam, and based on the profile, obtains the position of the beam spot. With this operation, the positional relation between the projection position of the pattern image of the reticle R and the laser spot irradiation position of

the alignment optical system ALG2, that is, the baseline amount of the alignment microscope ALG2 is obtained.

[0238]

According to the exposure apparatus 110 related to the second embodiment described so far, effects similar to the exposure apparatus 100 in the first embodiment described earlier can be obtained. Furthermore, in this case as well, the main controller 20 detects the baseline amount of the alignment microscope ALG2 using the aerial image measurement unit 59, and upon detecting the baseline amount, since the projection position of the reticle pattern image and the position of the alignment microscope ALG2 can be measured more directly by the aerial image measurement unit 59, measurement of the baseline amount becomes possible with high precision.

[0239]

The arrangement of the slit on the slit plate 90 of the aerial image measurement unit 59 is not limited to those previously described. For example, as is shown in FIG. 37A, a set of slits 22c, 22d respectively extending in the direction of 45° and 135° with respect to the X-axis, may be added to the set of slits 22a and 22b referred to earlier. As a matter of course, the slit width 2D, which is perpendicular to the longitudinal direction of the slits 22c and 22d, is set according to the same reference in the same size as the slits 22a and 22b.

[0240]

In this case, as is shown in FIG. 37A, for example, when the slit 22d is scanned with respect to the aerial image PM' in FIG. 37A while the aerial image measurement unit 59 (wafer stage WST) is being scanned in the direction indicated by the arrow C, the light intensity signal corresponding to the aerial image can be detected with high precision. In addition, as is shown in FIG. 37B, for example, when the slit 22c is scanned with respect to the aerial image PM' in FIG. 37B while the aerial image measurement unit 59 (wafer stage WST) is being scanned in the direction indicated by the arrow D, the light intensity signal corresponding to the aerial image can be detected with high precision.

[0241]

In the case of arranging the two sets of slits (22a, 22b)(22c, 22d) described above on the slit plate 90, since these slits in the respective sets are arranged apart from one another to a certain extent, as the arrangement of the photodetection optical system and the optical sensor within the wafer stage WST, the arrangement may be employed where the slit in each set can be selectively chosen by an optical or an electrical selection mechanism. To be more specific, a photodetection system, of which the optical path can be changed with a shutter, and a single photoconversion element may be combined, or a photodetection system and a photoconversion element may be respectively provided in the slits of each set.

[0242]

Following is a description on image recovery.

[0243]

From the equations (1) and (2) previously described, by the averaging of the slit scan, when the Fourier Transform is performed on the  $p(x)$  the type of spectrum is clarified in terms of spatial frequency. This is generally referred to as the instrumental function  $P(u)$ . The instrumental function is expressed by equation (13), referred to earlier.

[0244]

The  $P_{inv}(u)$ , as a filter with an inverse characteristic of the frequency characteristic in equation (13), is expressed as in the following equation (14), and when this is multiplied by the Fourier spectrum of the light intensity signal  $m(x)$  of the aerial image observed and then an inverse Fourier Transform performed, image recovery is thus performed.

$$P_{inv}(u) = 1/P(u) \quad (14)$$

For a complete image recovery, since the upper limit of the optical transfer function (OTF) of the incoherent image forming is  $2N.A. / \lambda$ , the following equation (15) needs to be satisfied

[0245]

[Formula 8]

$$D < \frac{\lambda}{4N.A.} \quad \dots (15)$$

[0246]

By using such a method of image recovery, it also becomes possible to recover an image profile having extremely thin isolated lines. Isolated lines include various frequency components, and when the aerial image of the isolated lines is measured at a plurality of focuses, measurement of the wavefront aberration of the lens can also be considered using these results.

[0247]

In addition, by performing image recovery on the L/S mark, which is a repetition pattern, measurement of the wavefront aberration of the discrete frequency component of the lens can also be considered.

[0248]

When aerial image measurement is performed upon these wavefront aberration measurements, it is preferable to use a unit, for example, like the aerial image measurement unit 59 in FIG. 37A, which is capable of aerial image measurement in the four directions shown in FIG. 37A.

[0249]

In each embodiment above, the case has been described when the present invention is applied to a projection exposure apparatus based on the step-and-scan method. The present invention, however, is not limited to this, and can be suitably applied to an exposure apparatus of the step-and-repeat type, which transfers a mask pattern onto a substrate when both the mask and substrate are in a stationary state, and sequentially moves the substrate with stepping operations.

[0250]

In addition, in each embodiment above, the case has been described when the present invention is applied to an exposure apparatus used for manufacturing a semiconductor. The present invention, however, is not limited to this, and can be broadly applied to, for example, an exposure apparatus for liquid crystals to transfer a liquid crystal display device pattern onto a square-shaped glass plate, or an exposure apparatus to produce a thin-film magnetic head.

[0251]

Also, in each embodiment above, the case has been described when the illumination light for exposure used, is a KrF excimer laser beam (248 nm), an ArF excimer laser beam (193 nm), or the like. The present invention, however, is not limited to this, and a g-line (436 nm), an i-line (365 nm), an F2 laser beam (157 nm), a copper vapor laser, a harmonic such as a YAG laser, and the like may be used as the illumination light for exposure.

[0252]

In addition, in each embodiment above, the case has been described when the projection optical system used is a reduction system. The present invention, however, is not limited to this, and a projection optical system of an equal magnification or a magnification system may be used.

[0253]

Also, in the case of using a linear motor (refer to U.S. Pat. No. 5,623,853, or the U.S. Pat. No. 5,528,118) for the wafer stage or the reticle stage, either of the air levitation type using air bearings or the magnetic levitation type using the Lorentz force or the reactance force may be used.

[0254]

In addition, the stage may be a type that moves along a guide, or it may be a guideless type that does not require a guide.

[0255]

The reaction force generated by the movement of the wafer stage may be released to mechanically the floor (ground) using a frame member, as is disclosed, for example, in Japanese Patent Laid Open No. 08-166475 and the corresponding U.S. Pat. No. 5,528,118.

[0256]

And, the reaction force generated by the movement of the reticle stage may be released mechanically to the floor (ground) using a frame member, as is disclosed, for example, in Japanese Patent Laid Open No. 08-330224 and the corresponding U.S. Pat. No. 416558.

[0257]

The illumination optical system, the projection optical system PL, and the like which is made of a plurality of lenses are incorporated into the main body of the exposure apparatus to carry out optical adjustment, then the wafer stage system, the reticle stage system, and the like which is made up of various mechanical components are assembled into the main body of the exposure apparatus and the wiring and piping connected. The exposure apparatus in the embodiment of the invention can be fabricated by performing total adjustment (electrical adjustment, operational adjustment). Also, the exposure apparatus is preferably made in a clean room in which temperature, degree of cleanliness, and the like are controlled.

[0258]

The semiconductor device is provided through a step where function/performance is designed for a device, a step where a reticle based on the design step is fabricated, a step where a wafer is fabricated from silicone material, a step where reticle pattern is transferred to the wafer by the exposure apparatus of the embodiment described above, a step where devices is assembled (including dicing, bonding, and packaging), and checking step.

[0259]

#### Effects of the Invention

As the circumstances described above, according to an aerial image measurement method and an aerial image measurement unit of the invention, there is an effect to be capable of measuring an aerial image with a sufficient accuracy.

[0260]

According to an image forming properties measurement method of the invention, there is an excellent effect that can accurately measure the image forming properties of the projection optical system.

[0261]

According to an exposure apparatus of the invention, there is an effect to contribute to improving the exposure accuracy.

#### Brief Description of the Drawings

FIG. 1

FIG. 1 is a schematic view showing the arrangement of an exposure apparatus 100 related to the first embodiment according to the present invention;

FIG. 2

FIG. 2 is a view showing an internal arrangement of the alignment microscope and the aerial image measurement unit in FIG. 1;

FIG. 3

FIG. 3 is a view showing a modified example of the aerial image measurement unit that has an arrangement of the optical sensor arranged external to the wafer stage;

FIG. 4

FIG. 4 is a view showing the state when the alignment microscope is detecting the alignment mark on the wafer;

FIG. 5

FIG. 5 is a view showing the state when the alignment microscope is detecting the slit of the aerial image measurement unit on baseline measurement by the alignment microscope;

FIG. 6

FIG. 6A is a planar view showing the aerial image measurement unit in a state when an aerial image  $PM'$  is formed on the slit plate on aerial image measurement;

FIG. 6B is a linear graph showing an example of the photodetection conversion signal (light intensity signal)  $P$  obtained upon the aerial image measurement;

FIG. 7

FIG. 7 is a linear graph showing the results of simulation at the best focus position, and shows the results of image forming simulation corresponding to the case when an aerial image of a L/S mark having a line width of  $0.2 \mu\text{m}$  and a duty ratio of 50%;

FIG. 8

FIG. 8 is a linear graph showing the spatial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal  $P_3$  in FIG. 7, along with the original intensity signal  $P_3$ ;

FIG. 9

FIG. 9 is a linear graph showing the results of simulation at the position defocused by  $0.2 \mu\text{m}$  from the best focus position;

FIG. 10

FIG. 10 is a linear graph showing the spatial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal  $P_3$  in FIG. 9, along with the original intensity signal  $P_3$ ;

FIG. 11

FIG. 11 is a linear graph showing the results of simulation at the position defocused by  $0.3 \mu\text{m}$  from the best focus position;

FIG. 12

FIG. 12 is a linear graph showing the spatial frequency component when Fourier Transform is performed on the intensity signal P3 in FIG. 11, along with the original intensity signal P3;

FIG. 13

FIG. 13 is a planar view showing an example of a measurement reticle used on detection of the shape of the image plane;

FIG. 14

FIG. 14 is a planar view showing an example of a measurement reticle used on detection of the spherical aberration;

FIG. 15

FIG. 15 is a planar view showing an example of a measurement reticle used upon magnification and distortion measurement;

FIG. 16

FIG. 16 is a planar view showing an example of an aerial image measurement unit 59 used upon magnification and distortion measurement;

FIG. 17

FIG. 17 is a planar view showing the aerial image measurement unit in a state when an aerial image CM<sub>n</sub>' of the measurement pattern is formed on the slit plate upon aerial image measurement using a reticle on which measurement patterns consisting of a large L/S pattern are formed;

FIG. 18

FIG. 18 is a view showing an example of a mark block on which an artificial box pattern and other measurement patterns are formed;

FIG. 19

FIG. 19 is a view for explaining the first measurement method of coma aberration, and shows an example of a resist image;

FIG. 20

FIG. 20 is a planar view showing an example of a measurement reticle used in the first measurement method of coma aberration;

FIG. 21

FIG. 21 is a planar view showing the aerial image measurement unit when an aerial image EM' is formed on the slit plate in the case of using a combined mark pattern that has an arrangement of a plurality of L/S patterns with five lines combined in a predetermined period as each measurement mark;

FIG. 22

FIG. 22 is a view for explaining that the aerial image EM'; indicated in FIG. 21 has two fundamental frequency components;

FIG. 23

FIG. 23A is a planar view showing an example of a measurement reticle used in the second measurement method of coma aberration; FIG. 23B is an enlarged view showing a measurement pattern of FIG. 23A;

FIG. 24

FIG. 24 is a planar view showing the aerial image measurement unit when an aerial image  $GM_n'$  of the measurement patterns consisting of a linear mark laterally symmetric that has a wide line pattern and a narrow line pattern arranged at a predetermined interval in the measurement direction is formed on the slit plate;

FIG. 25

FIG. 25 is a planar view showing the aerial image measurement unit when an aerial image  $HM'$  is formed of the measurement pattern indicated in FIG. 24 on the slit plate in the case when the linear marks are repeatedly arranged;

FIG. 26

FIG. 26 is a view showing measurement values of the contrast (the mark x) obtained at 13 points, when the slit plate is changed in the Z-axis direction in 13 stages (steps), with the horizontal axis as the Z-axis;

FIG. 27

FIG. 27 is a view showing measurement values of the amplitude of the first order component (the mark x) obtained at 13 points, when the slit plate is changed in the Z-axis direction in 13 stages (steps), with the horizontal axis as the Z-axis;

FIG. 28

FIG. 28A and FIG. 28B are graphs showing the S/N ratio related to focus detection in the case of applying the equation (6) when assuming an example of using a photo multiplier under the respective predetermined conditions;

FIG. 29

FIG. 29A and FIG. 29B are graphs showing the contrast respectively corresponding to FIG. 28A and FIG. 28B;

FIG. 30

FIG. 30A and FIG. 30B are graphs showing the first order respectively corresponding to FIG. 28A and FIG. 28B;

FIG. 31

FIG. 31A and FIG. 31B are graphs showing the S/N ratio related to focus detection in the case of applying the equation (8) under the same conditions as in FIG. 28A and FIG. 28B;

FIG. 32

FIG. 32A and FIG. 32B are views respectively showing the simulation data of the intensity signal of the light transmitting the slit, its differential signal, and the aerial image intensity, when the slit width is of equal magnification and is three times the minimum half-pitch;

FIG. 33

FIG. 33A and FIG. 33B are views respectively showing the simulation data of the intensity signal of the light transmitting the slit, its differential signal, and the aerial image intensity, when the slit width is five times the minimum half-pitch and is seven times the minimum half-pitch;

FIG. 34

FIG. 34 is a view showing the frequency characteristics when the slit width is equal, three times, and five times the half-pitch of the limit of resolution;

FIG. 35

FIG. 35 is a view showing an arrangement of an exposure apparatus related to the second embodiment of the present invention with a portion partly omitted;

FIG. 36

FIG. 36 is a view showing a state when the exposure apparatus in the second embodiment is using the aerial image measurement unit to measure the position of the laser beam spot upon baseline measurement with the alignment system ALG2;

FIG. 37

FIG. 37A and FIG. 37B are views for explaining other arrangement examples of the slit formed on the slit plate of the aerial image measurement unit, and the method of using the aerial image measurement units that have these slits formed; and

FIG. 38

FIG. 38A to FIG. 38C are views for explaining the conventional aerial image measurement method.

Description of Symbols

- 10 illumination system (illumination unit or a part of aerial image measurement unit)
- 20 main controller (controller, processing unit, or a part of aerial image measurement unit)
- 22a to 22d slit (a part of aerial image measurement unit)
- 24 optical sensor (photoelectric conversion device, a part of aerial image measurement unit)
- 90 slit plate (a part of aerial image measurement unit)
- 100 exposure apparatus
- PL projection optical system
- IL illumination light
- R reticle (mask)
- W wafer (substrate)
- WST wafer stage (substrate stage)
- ALG1, ALG2 alignment microscope (mark detection system)

FIG. 1

20 main controller

FIG. 6B

light intensity

FIG. 7

signal intensity

slit position

FIG. 8

signal intensity

slit position

FIG. 9

signal intensity

slit position

FIG. 10

signal intensity

slit position

FIG. 11

signal intensity

slit position

FIG. 12

signal intensity

slit position

FIG. 26

contrast

FIG. 27

first amplitude

FIG. 32A

signal intensity

slit position

FIG. 32B

signal intensity  
slit position

FIG. 33A

signal intensity  
slit position

FIG. 33B

signal intensity  
slit position

FIG. 34

yield  
frequency

FIG. 38B

signal intensity  
opening position

FIG. 38C

differential value of signal intensity  
opening position

Continued from front page

| (51) Int. Cl. <sup>7</sup> | Identification<br>Symbol | Office Reference Number  | FI                      | Technical indication location |
|----------------------------|--------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|
| G03F 7/02<br>H01L 21/027   |                          |  | G03F 7/22<br>H01L 21/30 | H<br>525R                     |
| F term (Reference)         | 2F065                    | AA04 AA06AA07 CC20 DD04<br>EE08 FF01 GG04 HH06 HH13<br>LL01 LL28 LL63 MM24 PP12<br>QQ16 QQ23QQ41 UU01 UU02<br>UU05 |                         |                               |
|                            | 2G086                    | HH05 HH07  |                         |                               |
|                            | 5F046                    | BA03 DB05 DB08 FA09 FA16<br>FB14 FB16  |                         |                               |